环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.12
第40卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第12期
2019年12月15日

目 次(卷终)

研究报告

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第12期 2019年12月
Vol. 40, No. 12 Dec., 2019

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析

张宁[1],张盛[1,2*],杨海超[1],张建通[3]
(1. 中国人民大学环境学院,北京 100872; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; 3. 华电国际山东信息管理有限公司,济南 250014)

摘要: 土壤污染问题已经成为粤港澳大湾区迈向国际一流湾区的桎梏,对标纽约、旧金山和东京三大世界一流湾区可以为应对大湾区土壤环境压力提供方向指引. 以 Web of Science 核心数据库中相关文献为研究对象,运用文献共被引分析、关键词共现分析和关键词突现检测的文献计量定量分析方法,对世界三大湾区土壤污染领域的研究现状进行了分析. 结果表明,目前世界湾区土壤污染的研究主题主要集中在土壤污染物来源、空间分布、修复处理研究,以及土壤污染的生物可利用度、对海洋生物的不利影响、海洋生物指标在土壤污染评估的作用;土壤污染物研究的热点集中在重金属污染和有机污染上,海洋生物关联研究则对土壤污染的毒性、引发的生物性畸变和生物标志物讨论较多. 通过对比国内外湾区土壤污染研究状况,发现我国湾区土壤污染研究相比世界三大湾区起步较晚,且现有国内文献成果的研究区域和主题分布不均衡,特别是在湾区土壤污染的海洋生物关联研究方面热度较低. 因此,开展粤港澳大湾区海陆一体化研究、扩展考察领域至土壤污染的相关海洋生物研究,对完善我国粤港澳大湾区土壤污染研究、应对大湾区土壤环境问题至关重要.

关键词: 粤港澳大湾区; 土壤污染; 重金属; 海洋生物; CiteSpace
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)12-5581-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201906210

Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

ZHANG Ning[1], ZHANG Sheng[1,2*], YANG Hai-chao[1], ZHANG Jian-tong[3]
(1. School of Environmental & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Huadian International Shandong Information Management Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: Soil pollution has become a constraint for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area to move toward becoming an international first-class bay area. Learning from the three major bay areas of New York, San Francisco, and Tokyo can provide guidance for alleviating the soil environmental pressure in the Greater Bay Area. Based on the relevant literature in the core database of the Web of Science, the current research status of soil pollution in the three major bay areas was analyzed by using co-citation analysis, keywords co-occurrence analysis, and keyword emergence detection. The results showed that the main research topics of soil pollution in the three major bay areas are focused mainly on the source, spatial distribution of and remediation of soil pollutants, bioavailability of soil pollution and its adverse effects on marine organisms, and the role of the marine biotic index in soil pollution assessment. Hotspots in the study of soil pollutants are concentrated in the areas of organic pollution and heavy metal pollution. Toxicity, imposex, and biomarkers are the hot topics in the related marine biological research. By comparing the research status of soil pollution in bay areas at home and abroad, it was found that the study of soil pollution in China's bay areas started relatively late compared with that in the three major bay areas and that the distributions of research area and subject are unbalanced. The intensity of research on the related marine biological research is relatively low. Therefore, carrying out research on the land-sea integration of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area is an urgent priority. The research field needs to be extended to the related marine biological research. In this way, the study of soil pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area can be improved and the problems of soil pollution can be addressed.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; soil pollution; heavy metal; marine organisms; CiteSpace

依托港口和港口城市的湾区经济,具有极高的开放性和集聚性,在驱动区域发展方面发挥着重要的纽带和辐射作用[1~3]. 粤港澳大湾区由珠三角九市(广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山、江门)和香港特别行政区、澳门特别行政区组成,是我国经济的重要增长引擎. 2019 年 2 月 18 日党中央、国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》,并在生态文明建设的相关章节中明确提出了土壤治理的相关要求.

粤港澳大湾区作为世界著名制造业带,目前尚处于由工业经济向服务经济转型升级的阶段[4,5]. 在工业化基础上高速发展的珠江三角洲地区,存在着严重的土壤污染问题[6]. 工业"三废"排放、机动车尾气排放、固体废弃物、农药化肥使用、废弃电器

收稿日期: 2019-06-28; **修订日期**: 2019-09-17
作者简介: 张宁(1994~),女,博士研究生,主要研究方向为环境经济政策,E-mail: zwz361025@163.com
* 通信作者,E-mail: zhangs0531@ruc.edu.cn

无序收集和粗放拆解、矿区开发等问题都造成了珠江三角洲地区的土壤污染[7]. 1999 ~ 2004 年“广东珠江三角洲多目标地球化学调查”和 2006 年“广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查”项目,对珠江三角洲的土壤环境质量进行全面清查,发现珠江三角洲的土壤环境问题已不容忽视,经济区总面积中三级和劣三级土壤所占比重高达 22.8%,土壤重金属污染强度大、涉及面积广[8,9]. 同时,香港、澳门特别行政区因为工业排放、废弃金属尾矿、汽车尾气排放、城市垃圾填埋和焚化处理、农业生产中污泥和化学肥料的施用,也存在土壤重金属污染和有机污染问题[10~14]. 土壤污染导致土壤质量和资源价值降低,对人类健康和经济可持续发展构成严重威胁,造成环境保护治理成本、社会稳定成本增加[15,16],成为粤港澳大湾区迈向世界一流湾区的桎梏.

考虑到湾区的经济发展需求和毗邻海湾的特殊地理生态条件,在应对粤港澳大湾区的土壤污染问题时,对标纽约、旧金山、东京三大世界一流湾区,学习借鉴其研究成果,可以为我国粤港澳大湾区的土壤污染相关研究提供方向指引,对加快粤港澳大湾区土壤治理和生态文明建设进程、实现“建成国际一流湾区”目标具有一定现实意义. 为全面准确把握世界三大湾区土壤污染相关研究的主题、热点和演进情况,本研究选择利用信息可视化分析工具 CiteSpace 进行分析. CiteSpace 基于共引分析理论和寻径网络算法,可以探寻某一知识领域的研究主题、研究热点及演进历程,帮助研究者形成对这一领域的知识结构和前沿动态的整体认识[17~20].

1 材料与方法

1.1 研究方法

本研究选择利用信息可视化分析软件 CiteSpace,基于 1989 ~ 2019 年 Web of Science 核心数据库的文献源,以世界三大湾区土壤污染相关研究的文献数据为研究对象,通过文献共被引分析、关键词共现分析、关键词突现检测,以科学知识图谱的形式对世界三大湾区土壤污染相关研究的知识结构和热点前沿等信息进行全景式展示.

为考察世界三大湾区土壤污染领域的研究主题情况,对相关研究群进行文献共被引分析,首先通过文献共被引分析结果中提供的文献被引频次、中心度和突现性指标信息,识别其中关键文献;对文献共被引网络进行聚类分析,将聚类视图与核心文献结合,分析世界三大湾区土壤污染相关研究的主题分布;进一步将聚类视图转化为时区视图(Time-zone)形式,对研究主题的演进历程进行分析. 为考察研究世界三大湾区土壤污染领域的热点情况,对相关研究群进行关键词共现分析,进一步对关键词共现分析结果进行聚类分析和关键词突现检测,结合聚类视图和突现关键词对世界三大湾区土壤污染相关研究的热点进行分析;进一步将聚类视图转化为时区视图形式,并结合突现关键词对研究热点的演进历程进行分析.

1.2 数据获取

本文以 Web of Science 核心数据库为数据来源,检索方式具体如下: Topic = [{(site * SAME pollut *) OR (site * SAME contaminat *) OR (soil * SAME pollut *) OR (soil * SAME contaminat *)} AND (bay *) AND (“New York” or “San Francisco” or “Tokyo”)]. 时间跨度为所有年份(1975 ~ 2019 年),更新时间为 2019 年 9 月 8 日. 经检索共得到 351 篇文献.

需要注意的是,在进行数据检索时往往面临着“查全率”(recall)和“查准率”(precision)的权衡取舍. 本研究所采取的上述关键词检索方案可以实现较高的查准率,相应存在查全率较低的问题,一些本质上属于世界三大湾区土壤污染研究领域的文献,由于没有使用本研究采取的检索关键词而被遗漏. 为降低影响,有必要对现有检索结果进行扩展. Chen 认为[21],在数据库中以“创建引文报告”的方式可以得到初次检索结果的施引文献,由于这些施引文献对初次检索结果进行了引用,有理由认为它们也是这一研究领域的相关文献. 参照这一做法,本研究通过在 Web of Science 核心数据库中“创建引文报告”,获得去除自引的施引文献 9018 篇,大大丰富了检索结果.

2 结果与分析

2.1 研究概况

对获取的 351 篇关键词检索文献和 9018 篇去除自引的施引文献的出版时间、国家/地区、研究方向的分布进行初步的描述统计,以形成对世界三大湾区土壤污染领域研究概况的认识.

在出版时间方面,如图 1 所示,关键词检索方案获取的文献在 1989 年首次出现后基本呈现出波动增长的态势,1994、1999、2004 ~ 2007 和 2011 年是文献成果迅速增长的 4 个时期;施引文献则相应最早出现在 1990 年,其后稳步增长. 这一结果说明世界三大湾区土壤污染领域的研究热度不断提高,日益受到学界关注.

在国家/地区分布方面,美国在关键词检索文献

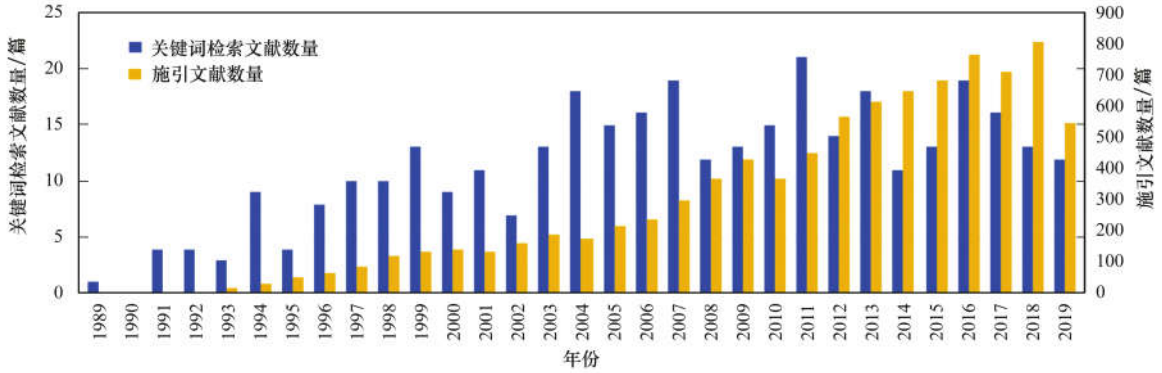

图 1　文献数量-出版时间分布

Fig. 1　Distribution of quantity and publication time of literature

和施引文献上的发文数量都具有绝对领先优势，其数量（占比）分别达到了 232 篇（66.1%）和 3113 篇（34.5%）. 关键词检索文献中，日本以 61 篇（17.4%）的发文量排名第二，这一国家/地区分布结果与世界三大湾区的地理分布相符. 施引文献中，除美国外发文最多的国家是中国，其文献数量（占比）为 1640 篇（18.2%）. 这一结果说明中国对世界三大湾区土壤污染研究的关注度较高，对世界三大湾区土壤污染相关研究的学习和借鉴是我国的一个重要研究热点.

在研究方向分布方面，在关键词检索文献和施引文献中，生态环境科学（Environmental Sciences Ecology）研究方向的文献数量都具有绝对优势，其数量（占比）分别达到了 252 篇（71.8%）和 5956 篇（66.0%）. 说明世界三大湾区土壤污染相关研究受到了生态环境科学领域的特别关注. 此外，毒理学（Toxicology）、工程学（Engineering）、海洋与淡水生物学（Marine Freshwater Biology）和水资源学（Water Resources）研究方向的发文量也相对突出，说明世界三大湾区土壤污染问题已经受到了多研究领域的共同关注，且在土壤污染的毒理研究、海洋与淡水生物相关研究、利用工程手段加以治理等方向的研究相对充分.

2.2　定量分析

本研究利用 CiteSpace 5.5.R2 软件进行定量分析. 采取文献共被引分析方法，通过识别关键文献和聚类分析，探究世界三大湾区土壤污染领域的研究主题分布情况；通过分析聚类时间视图，探究研究主题的演进历程；采取关键词共现分析方法，通过聚类分析和关键词突现检测，分析世界三大湾区土壤污染领域的研究热点；结合聚类时间视图和关键词突现检测结果，分析研究热点的演进历程.

2.2.1　文献共被引分析

运行 CiteSpace 软件得到共包括1 706个节点和2 047条连线的文献共被引网络图谱，对文献共被引网络进行聚类分析，并选择 LLR 算法从关键词中抽取聚类命名以添加标签，结果如图 2（a）所示；进一步将聚类视图转化为时区视图形式，结果如图 2（b）所示.

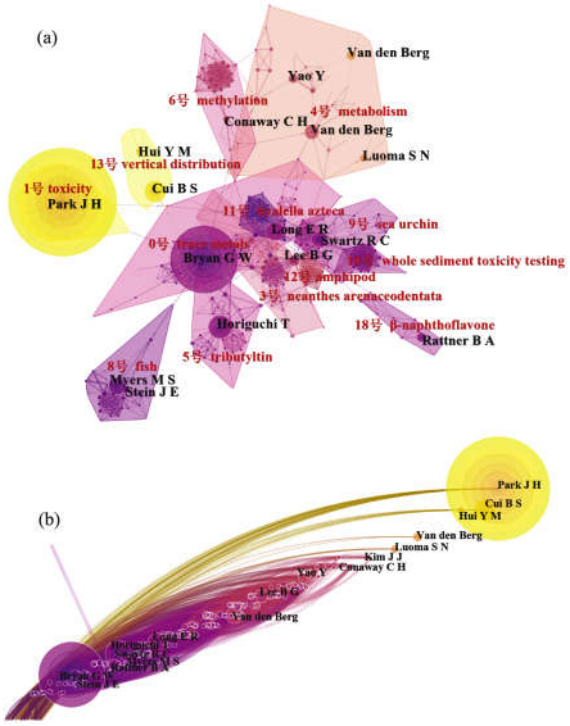

图 2　文献共被引分析结果

Fig. 2　Results of the co-citation analysis

在文献共被引网络图谱中，节点代表着分析对象（文献）. 节点大小代表着该文献的被引频次高低；节点间连线则代表着共被引关系. 节点内分层的环的颜色及宽度代表着不同时段的被引频次，颜色由冷色调的紫色系到暖色调的黄色系的变化则表征着时间由远及近. 连线颜色的含义与节点颜色含义相同.

2.2.1.1　关键文献

某一研究领域的关键文献是该领域内具有基础性的重大突破，在整个文献群中发挥着重要作用，是

研究主题的良好反映[22~25]. CiteSpace 提供的可以用于辨别关键文献的标准包括文献被引频次(Freq)、中心度(Centrality)和突现性(Burst). 被引频次和中心度较高的文献,其研究成果价值较高,可以看作是该领域的基础文献;而突现性较高的文献,意味着其在某一阶段的被引频次急速上升,具有后期成为中心文献的潜力[24,25].

文献共被引分析结果显示,本研究所选取的文献群中,中心度在 0.01 及以上的文献共计 22 篇,可以视为世界三大湾区土壤污染相关研究领域的高中心度重要文献. 在这 22 篇高中心度文献中,以中心度≥0.02 或者突现性 >0 或者被引频次≥5 作为条件筛选关键文献,得到在中心度、突现性或被引频次上表现突出的 12 篇文献,可以视为世界三大湾区土壤污染研究领域的关键文献. 关键文献具体信息如表 1 所示.

表 1 关键文献信息

Table 1 Information table of key literatures

序号	中心度	第一作者	出版年份	标题
1	0.06	Bryan G W	1992	Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review
2	0.03	Park J H	2011	Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils
3	0.02	Long E R	1995	Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments
4	0.02	Lee B G	2000	Influences of dietary uptake and reactive sulfides on metal bioavailability from aquatic sediments
5	0.02	Johnson L L	1993	Chemical contaminants and hepatic lesions in winter flounder (*Pleuronectes americanus*) from the Northeast Coast of the United States
6	0.01	Horiguchi T	1994	Imposex and organotin compounds in *Thais clavigera* and *T. bronni* in Japan
7	0.01	Cui B S	2009	Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China
8	0.01	Myers M S	1994	Relationships between toxicopathic hepatic lesions and exposure to chemical contaminants in English sole (*Pleuronectes vetulus*), starry flounder (*Platichthys stellatus*), and white croaker (*Genyonemus lineatus*) from selected marine sites on the Pacific Coast, USA
9	0.01	Swartz R C	1994	Sediment toxicity, contamination and amphipod abundance at a DDT- and dieldrin-contaminated site in San Francisco Bay
10	0.01	Van den Berg	1998	Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife
11	0.01	Conaway C H	2003	Mercury speciation in the San Francisco Bay estuary
12	0.01	Stein J E	1992	Bioindicators of contaminant exposure and sublethal effects in benthic fish from Puget Sound, WA, USA

对识别出的 12 篇关键文献进行具体分析. Bryan 等[26]综述了英国河口沉积物中重金属的生物利用度、生物积累和生物影响的相关研究; Park 等[27]对有机改良剂对重金属污染土壤的强化生物修复作用进行了综述;Long 等[28]测定了海洋及河口沉积物中微量金属、多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)和杀虫剂的浓度与有害生物反应发生率的关联度,并据此提出了 2 个可应用于沉积物质量评价的指导值;Lee 等[29]研究证实了食物摄取会决定水体沉积物中金属污染物的生物可利用度;Johnson 等[30]证明了 PAHs、DDT 和氯丹等污染物是造成美国东北海岸美洲拟鲽(*Pleuronectes americanus*)肝脏损伤的重要风险因子;Horiguchi 等[31]证明了日本的疣荔枝螺(*Thais clavigera*)和瘤荔枝螺(*T. bronni*)的性畸变发生率及程度与三丁基锡(TBT)和三苯基锡(TPT)污染有关;Cui 等[32]通过分析土壤盐分和有机质含量,认为黄河三角洲的湿地恢复工程有效提高了土壤质量;Myers 等[33]证明了环境污染物会导致海洋底栖鱼类的中毒性肝损伤;Swartz 等[34]发现旧金山湾区的狄氏剂(dieldrin)、DDT 及其代谢物(CDDT)污染与沉积物毒性呈正相关,与片脚类生物丰度呈负相关;Van den Berg 等[35]重新评估并修订了 PCBs、多氯代二苯并-对-二噁英(PCDDs)和多氯二苯并呋喃(PCDFs)对人类和野生动物的毒性当量因子(TEF);Conaway 等[36]对旧金山湾区河口沉积物和地表水中汞的来源及空间分布进行了探究;Stein 等[37]评估了用于反映底栖鱼类的污染暴露程度和亚致死效应的生化指标.

综合来看,本研究筛选出的 12 篇核心文献的研究主题可以总结为两大类:①土壤污染物的来源及空间分布和影响因素[36],及其修复处理[27,32];②土

壤污染的生物可利用度[28,29]、对海洋生物的不利影响[30,31,33,35]，以及海洋生物指标在土壤污染评估中的作用[28,34,37].

2.2.1.2　聚类分析

进一步对文献共被引网络进行聚类分析，将研究内容相近的文献进行分类并命名，可以对研究主题的分布情况进行有效把握. 而聚类分析结果的时区视图是对研究主题演化历程的良好展现.

如文献共被引网络聚类视图所示[图 2(a)]，世界三大湾区土壤污染领域的文献主要可以划分为 0 号 trace metals、1 号 toxicity、3 号 neanthes arenaceodentata、4 号 metabolism、5 号 tributyltin、6 号 methylation、8 号 fish、9 号 sea urchin、10 号 whole sediment toxicity testing、11 号 hyalella azteca、12 号 amphipod、13 号 vertical distribution、18 号 β-naphthoflavone 这 13 个聚类. 为进一步把握各聚类所反映的研究主题，以被引频次和中心度为筛选指标，识别出各聚类中的经典文献，结果如表 2.

聚类 0 号(trace metals)的经典文献研究主题集中于沉积物污染导致的有害生物效应. 其中，Bryan 等[26]重点关注河口沉积物中重金属污染的生物利用度、生物积累和生物影响；Long 等[28]则通过测定沉积物中金属、PCBs、PAHs 和杀虫剂的浓度与有害生物反应发生率之间的数量关系，定义了 2 个土壤沉积物质量评价的浓度范围指导值. 聚类 1 号(toxicity)的经典文献聚焦于土壤污染物的处理. Park 等[27]对有机改良剂对重金属污染土壤的强化生物修复作用进行了综述，认为重金属含量较低的有机改良剂是修复有毒金属污染土壤的有效手段. 聚类 3 号(neanthes arenaceodentata)的经典文献对沉积物中金属污染的生物可利用度进行了探讨. 其中，Lee 等[29]通过 4 种无脊椎动物的实验，证明了摄食行为决定金属污染物的生物积累；Wang[38]通过一个包含生物摄食活动、金属同化及外排效率的动力学模型，探究了金属在不同海洋食物网中的传递和富集；Longston 等[39]利用围隔实验对沉积物中金属生物可利用度的影响因素进行了研究. 聚类 4 号(metabolism)的经典文献的研究对象集中在二噁英和多氯联苯这两类持久性有机污染物上. 其中，Van den Berg 等[35]对 PCBs、PCDDs 和 PCDFs 对于人类和野生动物的毒性当量因子进行了讨论；Yao 等[40]的研究发现东京湾地区过去广泛使用的五氯酚(PCP)和氯硝酚(CNP)两种除草剂是 PCDDs、PCDFs 和共面多氯联苯(Co-PCBs)的主要来源；Eganhouse 等[41]分析了波士顿港某混合下水道周围表层沉积物中 PCBs 等有机污染物的来源. 聚类 5 号(tributyltin)的经典文献重点研究了沉积物中有机锡化合物污染对海洋生物的影响. 其中，Horiguchi 等[31]证明了日本的疣荔枝螺和瘤荔枝螺的性畸变与 TBT 和 TPT 污染有关；Kannan 等[42]分析了某些亚洲和大洋洲国家鱼类肌肉和肝脏组织内丁基锡(butyltin)化合物的残留浓度及分布；Waldock 等[43]分析认为底栖生物群落物种多样性的增加可以表征沉积物中三丁基锡污染减少. 聚类 6 号(methylation)的经典文献对湾区土壤金属污染来源、分布及变化趋势进行了讨论. 其中，Conaway 等[36]分析了旧金山湾区河口沉积物和地表水中汞的来源及空间分布；Luoma 等[44]探究了水华期南旧金山湾区金属污染物浓度的变化；Bothner 等[45]分析了波士顿港表层沉积物金属污染物浓度随时间的变化趋势及原因. 聚类 8 号(fish)的经典文献着重分析了沉积物污染对底栖鱼类造成的损伤. 其中，Myers 等[33]证明了环境污染会导致海洋底栖鱼类的中毒性肝损伤；Johnson 等[30]证明了 PAHs、DDT 和氯丹等污染物是造成美国东北海岸美洲拟鲽肝脏损伤的重要风险因子；Stein 等[37]评估了用于反映底栖鱼类的污染暴露程度和亚致死效应的生化指标. 聚类 9 号(sea urchin)的经典文献对有机污染物对海洋生物的影响进行了研究. 其中，Swartz 等[34]发现旧金山湾区的狄氏剂、DDT 及其代谢物 CDDT 污染与沉积物毒性呈正相关，与片脚类生物丰度呈负相关；Stein 等[46]发现幼鱼在普吉特湾(Puget Sound)城市河口的短时间停留即会造成体内 PAHs 浓度的明显升高. 聚类 10 号(whole sediment toxicity testing)的经典文献聚焦于沉积物污染物的毒性作用. 其中，Canfield 等[47]比较了底栖无脊椎动物群落组成测量与实验室毒性检验两种辨别沉积物污染的方法；Oberdörster 等[48]发现三丁基锡诱导产生性畸变的蜗牛存在睾酮代谢异常. 聚类 11 号(hyalella azteca)的经典文献重点分析了海洋生物对不同污染物的差异反应. 其中，Austen 等[49]研究了小型底栖动物群落对锌、铜、镉的差异反应；Bridges 等[50]证明了底栖多毛类生物对不同沉积物污染物的反应存在明显差异. 聚类 12 号(amphipod)的经典文献探讨了生物积累对沉积物质量评价的作用. 其中，Long 等[51]对比了 ERLs/ERMs 与 TELs/PELs 这两套用于评价沉积物质量的准则；Warren 等[52]利用原位模拟实验分析了底栖无脊椎动物体内镉积累的来源. 聚类 13 号(vertical distribution)的经典文献选择中国湾区作为研究区域. 其中，Cui 等[32]通过对土壤盐分和有机质含量的分析，认为黄河三角洲的湿地恢复工程有效提高了土壤质量；Hui 等[53]则对黄河、长

表 2 各聚类高被引经典文献信息

Table 2 Information table of highly cited classical literature in each cluster

聚类编号	聚类标签	经典文献标题
0	trace metals (微量金属)	(1) Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review (2) Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments
1	toxicity (毒性)	(1) Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils
3	neanthes arenaceodentata (海洋环节生物)	(1) Influences of dietary uptake and reactive sulfides on metal bioavailability from aquatic sediments (2) Interactions of trace metals and different marine food chains (3) Bioavailability of metals in sediments of the Dogger Bank (Central North Sea): a mesocosm study
4	metabolism (代谢)	(1) Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife (2) Identification of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin, dibenzofuran, and coplanar polychlorinated biphenyl sources in Tokyo Bay, Japan (3) Anthropogenic organic contaminants in the effluent of a combined sewer overflow: impact on Boston Harbor
5	tributyltin (三丁基锡)	(1) Imposex and organotin compounds in *Thais clavigera* and *T. bronni* in Japan (2) Butyltins in muscle and liver of fish collected from certain Asian and Oceanian countries (3) Surveys of the benthic infauna of the Crouch Estuary (UK) in relation to TBT contamination
6	methylation (甲基化)	(1) Mercury speciation in the San Francisco Bay estuary (2) Metal uptake by phytoplankton during a bloom in South San Francisco Bay: Implications for metal cycling in estuaries (3) Metal concentrations in surface sediments of Boston Harbor——changes with Time
8	fish (鱼类)	(1) Relationships between toxicopathic hepatic lesions and exposure to chemical contaminants in English sole (*Pleuronectes vetulus*), starry flounder (*Platichthys stellatus*), and white croaker (*Genyonemus lineatus*) from selected marine sites on the Pacific Coast, USA (2) Chemical contaminants and hepatic lesions in winter flounder (*Pleuronectes americanus*) from the Northeast Coast of the United States (3) Bioindicators of contaminant exposure and sublethal effects in benthic fish from Puget Sound, WA, USA
9	sea urchin (海胆)	(1) Sediment toxicity, contamination and amphipod abundance at a DDT- and dieldrin-contaminated site in San Francisco Bay (2) Contaminant exposure and biochemical effects in outmigrant juvenile chinook salmon from urban and nonurban estuaries of Puget Sound, Washington
10	whole sediment toxicity testing (全沉积物毒性检验)	(1) Testosterone metabolism in imposex and normal *Ilyanassa obsoleta*: comparison of field and TBTA Cl-induced imposex (2) Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach
11	hyalella azteca (端足类美洲钩虾)	(1) The specificity of meiobenthic community responses to different pollutants: results from microcosm experiments (2) Effects of sediment amended with sewage, algae, or hydrocarbons on growth and reproduction in two opportunistic polychaetes
12	amphipod (端足类生物)	(1) Modelling cadmium accumulation by benthic invertebrates in situ: the relative contributions of sediment and overlying water reservoirs to organism cadmium concentrations (2) Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems
13	vertical distribution (垂直分布)	(1) Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China (2) Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Yellow River Estuary and Yangtze River Estuary, China
18	β-naphthoflavone (β-萘黄酮)	(1) Biomonitoring environmental contamination with pipping black-crowned night heron embryos: induction of cytochrome P450 (2) Toxicopathic hepatic lesions in subadult English sole (*Pleuronectes vetulus*) from Puget Sound, Washington, USA: relationships with other biomarkers of contaminant exposure

江河口沉积物中 PAHs 的含量、分布进行了测定. 聚类 18 号(β-naphthoflavone)的经典文献的研究对象集中在可以表征污染影响的生物标志物. Rattner 等[54]的实验结果表明，可以用细胞色素 P450 表征黑冠夜鹭胚胎受 PCBs 的影响；Myers 等[55]讨论了中毒性肝损伤作为生物标志物的作用.

文献群的 13 个聚类所反映的研究主题分布与 12 篇关键文献的研究主题分布基本一致，即研究主题主要集中在两大方面：①土壤污染物的来源、空间分布及影响因素(聚类 4、6、13 号)，及其修复处理(聚类 1 号)；②土壤污染的生物可利用度(聚类 3 号)、对海洋生物的不利影响(聚类 0、5、8、9、10、11 号)，以及海洋生物指标在土壤污染评估中的作用(聚类 12、18 号).

结合文献共被引分析中识别出的关键文献和聚类分析结果，可以认为世界三大湾区土壤污染领域的研究主题集中分布在“土壤污染物的来源、空间分布、影响因素及其修复处理”，以及“土壤污染的生物可利用度、对海洋生物的不利影响，以及海洋生物指标在土壤污染评估中的作用”这两方面.

为进一步考察研究主题的演进历程，对文献共被引网络的时区视图进行分析[图 2(b)]. 文献共被引网络的时区视图将首次被引用时间相同的文献节点放置于同一时区，时区间节点连线代表着研究的传承，进而可以从时间维度上展示研究主题的演进. 可以直观看出：1989 ~ 2005 年各时区内的节点密集且分布较为均匀，说明这一时期世界三大湾区土壤污染领域的研究热度较高，涌现了大量具有较大影响力的研究成果，如上一小节识别出的文献[26,28,31,33,35]；这一阶段的时区间节点连线也高度密集，说明前后研究时期的传承关系较强，前期的重要文献成果具有一定程度的理论创新、为后期的研究开展提供了奠基性的作用. 2005 年后，各时区的文献节点和连线数量相对较少，即有影响力的研究成果较少，且与前期研究成果联系不甚紧密，表明这一时期世界三大湾区土壤污染领域的研究热度下降，同时研究主题呈现多样化趋势.

2.2.2　关键词共现分析

关键词是文献内容的高度凝练，通过关键词共现分析，可以识别出被较多文献共同探讨的科学问题，即研究热点[22,23]. 区别于文献共被引网络，在关键词共现网络中节点代表关键词.

2.2.2.1　聚类分析

运行 CiteSpace 软件得到共包括 299 个节点和 2474 条连线的关键词共现网络图谱，进一步得到关键词共现网络聚类分析结果如图 3(a)所示，聚类结果的时区视图如图 3(b)所示.

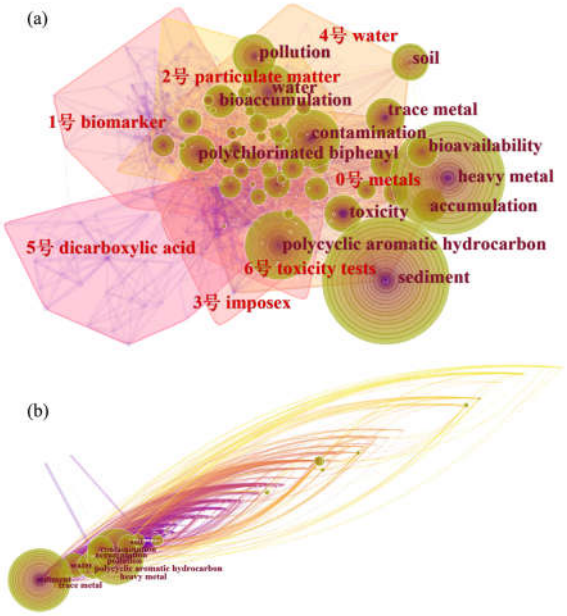

图 3　关键词共现分析结果

Fig. 3　Results of keywords co-occurrence analysis

对关键词共现网络进行聚类分析，以观察研究热点分布情况[图 3(a)]. 世界三大湾区土壤污染领域的关键词主要可以划分为 0 号金属(metals)、1 号生物标志物(biomarker)、2 号颗粒物(particulate matter)、3 号性畸变(imposex)、4 号水(water)、5 号二羧酸(dicarboxylic acid)和 6 号毒性检验(toxicity tests)这 7 个聚类.

结合文献共被引分析部分得到的研究主题相关结论，可以发现：在“土壤污染物的来源、空间分布、影响因素及其修复处理”研究主题上，关键词聚类 0 号金属(metals)、2 号颗粒物(particulate matter)、4 号水(water)和 5 号二羧酸(dicarboxylic acid)可以看作是其中的研究热点，即金属污染物是较热门的研究对象，且与水污染研究联系紧密，在污染土壤修复研究领域中则对二羧酸的讨论较多. 在“土壤污染的生物可利用度、对海洋生物的不利影响、海洋生物指标在土壤污染评估中的作用”研究主题上，关键词聚类 1 号生物标志物(biomarker)、3 号性畸变(imposex)和 6 号毒性检验(toxicity tests)可以看作是其中的研究热点，即海洋生物关联研究在土壤污染的毒性、引发的生物性畸变，以及用于评价的生物标志物在方面讨论较多.

为对研究热点的演进历程形成直观认识，对关键词共现网络时区视图形式进行分析[图 3(b)]. 可以发现，1991 ~ 1997 年间世界三大湾区土壤污染相关研究的热点较为集中，沉积物的重金属污染和以多环芳烃为代表的有机污染的相关研究热度很

高,并且为后续的研究进展提供了基础,前后研究时期的传承性较强. 1997 年后的研究热点不再呈现出高度集中的趋势,而是更为分散和多样化.

2.2.2.2 关键词突现分析

除聚类分析外,关键词突现分析也是对研究热点的良好反映,并且可以实现对研究热点及其演进的定量描述. 利用 CiteSpace 软件分析关键词突现分析,结果发现:在本研究所选取的文献群的时间跨度范围内(1989 ~ 2019 年),前 25 位的突现关键词的突现强度都达到了 3 以上,说明这些关键词都是世界三大湾区土壤污染领域中的研究热点的良好反映;25 个高突现强度的关键词基本属于以下 2 类,生物类:英国舌鳎(english sole)、虹鳟(rainbow trout)、小珠母贝(nucella lapillus)、舌鳎(sole parophrys vetulus)、美洲拟鲽(winter flounder)、小型底栖动物(meiofauna)、犬峨螺(dog whelk)、波罗的海白樱蛤(macoma balthica)、贻贝(mussel mytilus eduli)和肝脏(liver);污染物类:烃(hydrocarbon)、二羧酸(dicarboxylic acid)、防污漆(antifouling paint)、残留(residue)、铜(copper)、三丁基锡(tbt)、芳香烃(aromatic hydrocarbon)、酸可挥发硫(acid volatile sulfide)、有机氯(organochlorine)、污染沉积物(contaminated sediment)和多氯联苯(polychlorinated biphenyls pcb). 这一结果与前文中的分析结果基本一致,进一步印证了已经得到的有关研究主题和热点分布的结论.

突现关键词出现和存续时间可以反映研究热点的演进历程. 本研究所选取的排名前 25 的高强度突现关键词出现时间较为集中,均在 1991 ~ 1995 年间突现,说明这一时段是世界三大湾区土壤污染研究的活跃期,研究中心呈现多样化的态势;2005 年后不再有突现关键词产生,说明世界三大湾区土壤污染研究领域没有新的研究热点和前沿出现. 在存续时间方面,大多数突现关键词存续时间较短,普吉特湾(puget sound)、虹鳟(rainbow trout)、波罗的海白樱蛤(macoma balthica)、贻贝(mussel mytilus eduli)、烃(hydrocarbon)、酸可挥发硫(acid volatile sulfide)、有机氯(organochlorine)和三丁基锡(tbt)这 8 个突现关键词存续时间相对较长,均达到了 10 a 及以上,说明关于这 8 个研究问题的讨论较为充分.

2.3 国内外湾区土壤污染研究对比

对国内湾区土壤污染研究现状进行考察并对比国内外研究情况,可以为我国粤港澳大湾区土壤污染相关研究提供方向指引,进而为应对大湾区土壤环境问题、加快生态文明建设、实现国际一流湾区建设目标提供经验借鉴. 为更加全面地了解我国湾区土壤污染研究,将研究区域进一步拓展至长江三角洲地区与环渤海地区.

选择 CNKI 数据库作为国内湾区土壤污染研究的中文文献源,检索条件如下:检索主题为[(“粤港澳”或含“珠江三角洲”或含“珠三角”或含“广州”或含“佛山”或含“肇庆”或含“深圳”或含“东莞”或含“惠州”或含“珠海”或含“中山”或含“江门”或含“香港”或含“澳门”或含“长江三角洲”或含“长三角”或含“环渤海”或含“京津冀”或含“黄河三角洲”)并且(“土壤”或含“场地”)并且(“污染”)];来源类别为 SCI 来源期刊、EI 来源期刊、核心期刊、CSSCI 和 CSCD;时间跨度为所有年份. 检索共得到 203 篇文献,其中 123 篇以珠江三角洲地区为研究区域,46 篇以长江三角洲地区为研究区域,34 篇以环渤海地区为研究区域,2 篇以香港为研究区域,未检索到以澳门为研究区域的文献,也未检索到以粤港澳大湾区整体为研究区域的文献(珠江三角洲地区与长江三角洲地区的文献群存在 2 篇交叉文献). 选择 Web of Science 核心数据库作为国内湾区土壤污染研究的英文文献源,检索条件如下:Topic = [{(site * SAME pollut *) OR (site * SAME contaminat *) OR (soil * SAME pollut *) OR (soil * SAME contaminat *)} AND (bay *) AND (“Pearl River” OR “Zhujiang” OR “Yangtze River” OR “Yellow River” OR “Bohai”)] AND Title = (Chin *),时间跨度为所有年份(1975 ~ 2019 年). 检索共得到 176 篇文献. 上述检索更新时间均为 2019 年 9 月 8 日.

对上述方案获取的文献分别进行关键词共现分析,以考察国内湾区土壤污染领域的研究热点. 对 203 篇中文文献进行关键词共现分析,以中心度 >0 为条件筛选得到 18 个核心关键词;为更加直观辨别其中的研究热点,进一步进行聚类分析,发现国内湾区土壤污染相关中文文献成果的关键词主要可以划分为 0 号重金属污染、1 号珠江三角洲、2 号空间分布、3 号土壤重金属、4 号酸雨和 5 号石油污染这 6 个聚类. 可以看出,国内相关中文文献成果多选择珠江三角洲作为研究区域,且主要聚焦于土壤重金属污染和石油污染. 此外,虽然未出现海洋生物关联研究方面的关键词聚类,但筛选得到的核心关键词中包含“富集系数”和“生物有效性”,这表明在海洋生物关联研究方面,国内的中文文献成果对生物有效性和生物富集效应讨论较多,但整体研究热度仍相对较低.

对 176 篇国内湾区土壤污染领域的英文文献进行关键词共现分析,以中心度为条件筛选得到 51 个

核心关键词. 进行聚类分析后,发现国内相关英文文献成果的关键词主要可以划分为 0 号沉积物分析(sediment analysis)、1 号珠江三角洲(Pearl River Delta)、2 号重金属(heavy metals)、3 号多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons)、4 号海水(seawater)和 5 号滩涂(tidal flat)这 6 个聚类. 可以看出,珠江三角洲同时也是我国湾区土壤污染领域英文文献的热门研究区域,重金属和多环芳烃则是其热门研究对象. 同样,核心关键词中包含"生态风险(ecological risk)"、"积累(accumulation)"、"质量指导值(quality guideline)"、"红树林(mangrove)"和"生态系统(ecosystem)",对聚类结果进行了补充,表明相较于国内相关中文文献成果,英文文献成果对于湾区土壤污染关联的海洋生物影响及指标研究的讨论更充分、主题更丰富、热度更高;但目前已形成的受众多学者共同关注、进行集中讨论的中心问题相对较少的问题同样存在.

由文献出版时间、研究区域分布情况和关键词共现分析结果,可以发现我国有关粤港澳大湾区土壤污染的研究主要存在以下问题:①从时间维度看,世界三大湾区土壤污染研究的最早文献出现在 1989 年,而我国湾区土壤污染领域的相关中文文献、英文文献分别首次出现于 1995 年和 2000 年,起步相对较晚;②从区域维度看,现有国内文献成果研究区域分布不均衡,多数已有文献以珠江三角洲为研究对象,对长江三角洲、环渤海地区以及香港、澳门特别行政区的研究较少,且缺少针对粤港澳大湾区的海陆一体化研究;③从研究主题分布维度看,目前国内湾区土壤污染相关研究在重金属污染及多环芳烃等有机污染上的热度较高,在海洋生物关联研究方面的研究热度相对较低,已形成的受到共同关注的中心问题相对较少.

尚未完成由工业经济向服务经济转型的粤港澳大湾区,经济发展与环境保护之间的矛盾已经凸显,土壤污染形势较为严峻[6~14]. 由于土壤污染具有复杂性与联动性,污染物通过转化和迁移会对水资源及相关生物资源产生影响[56~59]. 而湾区因为依托海湾的特殊地理条件,其土壤污染物极有可能对海洋造成污染,进而威胁海洋生物多样性. 土壤污染的特殊性和湾区地理位置的独特性,意味着湾区的土壤污染问题必然内涵着海洋污染和水生生物影响等关联问题[60~62]. 因此,在应对粤港澳大湾区土壤污染问题时,需从整体系统角度,考虑土壤污染与海洋污染、海洋生物影响的综合治理,以土壤污染治理为突破口带动海洋污染治理和海洋生物多样性保护[58,61~63]. 由前文分析可以看出,世界三大湾区土壤污染研究领域对海洋生物的关联研究高度重视,研究成果丰富. 因此有必要对粤港澳大湾区土壤污染海陆一体化研究领域进行补充和完善.

3　结论

(1)基于国内外研究差异,本研究发现国外世界三大湾区土壤污染领域的研究主题主要分布在"土壤污染物的来源、空间分布、影响因素及其修复处理",以及"土壤污染的生物利用度、对海洋生物的不利影响、海洋生物指标在土壤污染评估中的作用"两方面.

(2)我国湾区土壤污染的现有研究成果较世界先进国家水平居中,研究热点集中在重金属污染问题上,土壤污染的海洋生物关联研究方面成果相对较少. 湾区土壤问题的核心点还是土壤,在此知识基础上结合其特殊地理位置推进的湾区土壤污染研究,势必要经历由陆地到海域再到海陆一体化的研究发展历程. 由于我国湾区土壤污染研究起步相对较晚,相比世界三大湾区,在海洋生物关联研究方面还存在一定差距.

(3)通过对世界三大湾区土壤污染相关文献的研究主题及热点分析,借鉴国外一流湾区的经验,对未来我国粤港澳大湾区土壤污染研究的进一步开展提出以下建议:①需对香港及澳门特别行政区的土壤污染相关研究进行补充、完善和整合,并开展粤港澳大湾区范围的联合研究,以改进目前不均衡的研究区域分布状况;②进一步开展粤港澳大湾区土壤污染的海陆一体研究,全面推进大湾区土壤污染风险预警和综合治理方案体系建设.

参考文献:

[1] 鲁志国, 潘凤, 闫振坤. 全球湾区经济比较与综合评价研究[J]. 科技进步与对策, 2015, **32**(11): 112-116.

[2] 范丹, 王明旭. 国际三大湾区环境保护对粤港澳大湾区的经验启示[J]. 环境科学与管理, 2019, **44**(4): 13-16.
Fan D, Wang M X. Enlightenments of environmental protection in three international bay area to Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Environmental Science and Management, 2019, **44**(4): 13-16.

[3] 蔡赤萌. 粤港澳大湾区城市群建设的战略意义和现实挑战[J]. 广东社会科学, 2017, (4): 5-14.
Cai C M. The building of a world-class city cluster in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: strategic meanings and challenges[J]. Social Sciences in Guangdong, 2017, (4): 5-14.

[4] 王力. 对标世界一流湾区: 加快提升中国三大湾区发展能级[J]. 银行家, 2019, (5): 73-78.
Wang L. Accelerate energy level of china's three major bay areas[J]. Chinese Banker, 2019, (5): 73-78.

[5] 杨本建, 林云鹏. 粤港澳大湾区制造业升级现状分析[J]. 城市观察, 2018, **10**(4): 7-16.
Yang B J, Lin Y P. The status-quo of manufacturing industry

upgrade in the Guangdong-Hong Kong- Macao Bay Area[J]. Urban Insight, 2018, **10**(4): 7-16.

[6] 陈章喜. 基于环境治理的珠三角工业结构优化分析[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2018, **40**(3): 90-100.
Chen Z X. Optimization analysis of industrial structure of Pearl River Delta based on environmental governance [J]. Jinan Journal (Philosophy & Social Science Edition), 2018, **40**(3): 90-100.

[7] 骆永明, 章海波, 滕应, 等. 长江、珠江三角洲土壤及其环境[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[8] 赖启宏. 珠江三角洲多目标区域地球化学生态环境评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2005.

[9] 窦磊, 杜海燕, 黄宇辉, 等. 珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查成果综述[J]. 中国地质调查, 2015, **2**(4): 47-55.
Dou L, Du H Y, Huang Y H, *et al*. Main research achievements of agro-geological and eco-geochemical research in Pearl River Delta Economic Zone, Guangdong Province, China [J]. Geological Survey of China, 2015, **2**(4): 47-55.

[10] 骆永明. 香港地区土壤及其环境[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[11] 骆永明, 章海波, 赵其国, 等. 香港土壤研究Ⅰ. 研究现状与展望[J]. 土壤学报, 2005, **42**(2): 314-322.
Luo Y M, Zhang H B, Zhao Q G, *et al*. Hong Kong soil researches Ⅰ. An overview[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(2): 314-322.

[12] 章海波, 骆永明, 黄铭洪, 等. 香港土壤研究Ⅲ. 土壤中多环芳烃的含量及其来源初探[J]. 土壤学报, 2005, **42**(6): 936-941.
Zhang H B, Luo Y M, Huang M H, *et al*. Hong Kong soil researches Ⅲ. PAHs contents in soils and their origins[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(6): 936-941.

[13] 章海波, 骆永明, 赵其国, 等. 香港土壤研究Ⅳ. 土壤中有机氯化合物的含量和组成[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 220-225.
Zhang Y B, Luo Y M, Zhao Q G, *et al*. Hong Kong soil researches Ⅳ. Contents and compositions of organochlorines in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **43**(2): 220-225.

[14] 章海波, 骆永明, 赵其国, 等. 香港土壤研究Ⅶ. BCR 提取法研究重金属的形态及其潜在环境风险[J]. 土壤学报, 2010, **47**(5): 865-871.
Zhang Y B, Luo Y M, Zhao Q G, *et al*. Hong Kong soil researches Ⅶ. Research on fractions of heavy metals and their potential environ-mental risks in soil based on BCR sequential extraction[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(5): 865-871.

[15] 李俊民, 李勇. 日本、美国土地污染治理经验分析[J]. 世界农业, 2014, **36**(3): 48-51.

[16] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006, **38**(5): 505-508.
Luo Y M, Teng Y. Status of soil pollution degradation and countermeasures in China[J]. Soils, 2006, **38**(5): 505-508.

[17] Chen C M. Science Mapping: a systematic review of the literature [J]. Journal of Data and Information Science, 2017, **2**(2): 1-40.

[18] 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.

[19] 陈悦, 刘则渊, 陈劲, 等. 科学知识图谱的发展历程[J]. 科学学研究, 2008, **26**(3): 449-460.
Chen Y, Liu Z Y, Chen J, *et al*. History and theory of mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2008, **26**(3): 449-460.

[20] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, **33**(2): 242-253.
Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, *et al*. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, **33**(2): 242-253.

[21] Chen C M, Hu Z G, Liu S B, *et al*. Emerging trends in regenerative medicine: a scientometric analysis in *CiteSpace*[J]. Expert Opinion on Biological Therapy, 2012, **12**(5): 593-608.

[22] 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[J]. 经济地理, 2014, **34**(4): 7-12, 45.
Li W, Sun B D. The knowledge structure and research hotspots of west economic geography: visualized quantitative research based on CiteSpace[J]. Economic Geography, 2014, **34**(4): 7-12, 45.

[23] 姬杰辉, 王景云. 基于 CiteSpace 的土壤法律研究可视化分析[J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2019, **12**(2): 171-176.
Ji J H, Wang J Y. Visualization analysis of law on soil based on CiteSpace[J]. Journal of Shenyang University of Technology (Social Science Edition), 2019, **12**(2): 171-176.

[24] 李彬彬, 许明祥, 巩晨, 等. 国际土壤质量研究热点与趋势——基于大数据的 Citespace 可视化分析[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(11): 1983-1998.
Li B B, Xu M X, Gong C, *et al*. Hotspots and trends in international soil quality research [J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(11): 1983-1998.

[25] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(13): 3693-3703.
Qin X N, Lu X L, Wu C Y. The knowledge mapping of domestic ecological security research: bibliometric analysis based on Citespace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(13): 3693-3703.

[26] Bryan G W, Langston W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review [J]. Environmental Pollution, 1992, **76**(2): 89-131.

[27] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, *et al*. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **185**(2-3): 549-574.

[28] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al*. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.

[29] Lee B G, Griscom S B, Lee J S, *et al*. Influences of dietary uptake and reactive sulfides on metal bioavailability from aquatic sediments[J]. Science, 2000, **287**(5451): 282-284.

[30] Johnson L L, Stehr C M, Olson O P, *et al*. Chemical contaminants and hepatic lesions in winter flounder (*Pleuronectes americanus*) from the northeast coast of the United States[J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(13): 2759-2771.

[31] Horiguchi T, Shiraishi H, Shimizu M, *et al*. Imposex and organotin compounds in *Thais clavigera* and *T. bronni* in Japan [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1994, **74**(3): 651-669.

[32] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, *et al*. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(7): 1090-1103.

[33] Myers M S, Stehr C M, Olson O P, *et al*. Relationships between toxicopathic hepatic lesions and exposure to chemical contaminants in English sole (*Pleuronectes vetulus*), starry flounder (*Platichthys stellatus*), and white croaker (*Genyonemus lineatus*) from selected marine sites on the Pacific Coast, USA [J]. Environmental Health Perspectives, 1994, **102**(2): 200-215.

[34] Swartz R C, Cole F A, Lamberson J O, *et al*. Sediment toxicity, contamination and amphipod abundance at a DDT- and dieldrin-contaminated site in San Francisco Bay [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994, **13**(6): 949-962.

[35] Van den Berg M, Birnbaum L, Bosveld A T, *et al*. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife [J]. Environmental Health Perspectives, 1998, **106**(12): 775-792.

[36] Conaway C H, Squire S, Mason R P, *et al*. Mercury speciation in the San Francisco Bay estuary[J]. Marine Chemistry, 2003, **80**(2-3): 199-225.

[37] Stein J E, Collier T K, Reichert W L, *et al*. Bioindicators of contaminant exposure and sublethal effects in benthic fish from Puget Sound, WA, USA[J]. Marine Environmental Research, 1993, **35**(1-2): 95-100.

[38] Wang W X. Interactions of trace metals and different marine food chains[J]. Marine Ecology Progress Series, 2002, **243**(11): 295-309.

[39] Langston W J, Burt G R, Pope N D. Bioavailability of metals in sediments of the Dogger Bank (central North Sea): a mesocosm study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, **48**(5): 519-540.

[40] Yao Y, Masunaga S, Takada H, *et al*. Identification of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin, dibenzofuran, and coplanar polychlorinated biphenyl sources in Tokyo Bay, Japan [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, **21**(5): 991-998.

[41] Eganhouse R P, Sherblom P M. Anthropogenic organic contaminants in the effluent of a combined sewer overflow: impact on Boston Harbor[J]. Marine Environmental Research, 2001, **51**(1): 51-74.

[42] Kannan K, Tanabe S, Iwata H, *et al*. Butyltins in muscle and liver of fish collected from certain Asian and Oceanian countries [J]. Environmental Pollution, 1995, **90**(3): 279-290.

[43] Waldock R, Rees H L, Matthiessen P, *et al*. Surveys of the benthic infauna of the Crouch Estuary (UK) in relation to TBT contamination[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1999, **79**(2): 225-232.

[44] Luoma S N, van Geen A, Lee B G, *et al*. Metal uptake by phytoplankton during a bloom in south San Francisco Bay: implications for metal cycling in estuaries[J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(5): 1007-1016.

[45] Bothner M H, ten Brink M B, Manheim F T. Metal concentrations in surface sediments of Boston Harbor—changes with time[J]. Marine Environmental Research, 1998, **45**(2): 127-155.

[46] Stein J E, Hom T, Collier T K, *et al*. Contaminant exposure and biochemical effects in outmigrant juvenile chinook salmon from urban and nonurban estuaries of Puget Sound, Washington[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1995, **14**(6): 1019-1029.

[47] Canfield T J, Dwyer F J, Fairchild J F, *et al*. Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach[J]. Journal of Great Lakes Research, 1996, **22**(3): 565-583.

[48] Oberdörster E, Rittschof D, McClellan-Green P. Testosterone metabolism in imposex and normal *Ilyanassa obsoleta*: comparison of field and TBTA Cl-induced imposex [J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, **36**(2): 144-151.

[49] Austen M C, McEvoy A J, Warwick R M. The specificity of meiobenthic community responses to different pollutants: results from microcosm experiments [J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, **28**(9): 557-563.

[50] Bridges T S, Levin L A, Cabrera D, *et al*. Effects of sediment amended with sewage, algae, or hydrocarbons on growth and reproduction in two opportunistic polychaetes [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1994, **177**(1): 99-119.

[51] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 1998, **4**(5): 1019-1039.

[52] Warren L A, Tessier A, Hare L. Modelling cadmium accumulation by benthic invertebrates in situ: the relative contributions of sediment and overlying water reservoirs to organism cadmium concentrations [J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(7): 1442-1454.

[53] Hui Y M, Zheng M H, Liu Z T, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Yellow River Estuary and Yangtze River Estuary, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(12): 1625-1631.

[54] Rattner B A, Melancon M J, Custer T W, *et al*. Biomonitoring environmental contamination with pipping black-crowned night heron embryos: induction of cytochrome P450 [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, **12**(9): 1719-1732.

[55] Myers M S, Johnson L L, Hom T, *et al*. Toxicopathic hepatic lesions in subadult English sole (*Pleuronectes vetuls*) from Puget Sound, Washington, USA: relationships with other biomarkers of contaminant exposure [J]. Marine Environmental Research, 1998, **45**(1): 47-76.

[56] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 等. 城市工业污染场地：中国环境修复领域的新课题[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 784-794.
Liao X Y, Chong Z Y, Yan X L, *et al*. Urban industrial contaminated sites: a new issue in the field of environmental remediation in China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(3): 784-794.

[57] 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 等. 某矿区土壤和地下水重金属污染调查与评价[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(12): 4687-4693.
Lei M, Zeng M, Liao B H, *et al*. Investigation and evaluation on heavy metal contamination in soils and groundwater of a mine zone[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(12): 4687-4693.

[58] 刘玉强, 李丽, 王琪, 等. 典型铬渣污染场地的污染状况与综合整治对策[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 248-253.
Liu Y Q, Li L, Wang Q, *et al*. Study on pollution situation at typical chrome residue contaminated sites and corresponding integrated remediation plan [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(2): 248-253.

[59] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, **21**(S1): 558-565.

Luo Y M. Current research and development in soil remediation technologies[J]. Progress in Chemistry, 2009, **21**(S1): 558-565.

[60] Lu Y L, Wang R S, Zhang Y Q, *et al*. Ecosystem health towards sustainability[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2015, **1**(1): 1-15.

[61] 吕永龙, 苑晶晶, 李奇锋, 等. 陆源人类活动对近海生态系统的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1183-1191.
Lü Y L, Yuan J J, Li Q F, *et al*. Impacts of land-based human activities on coastal and offshore marine ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1183-1191.

[62] Lu Y L. Sustainable development: rate oceans' capital to help achieve SDGs[J]. Nature, 2016, **537**(7618): 34.

[63] 苑晶晶, 吕永龙, 贺桂珍. 海洋可持续发展目标与海洋和滨海生态系统管理[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8139-8147.
Yuan J J, Lu Y L, He G Z. Sustainable development goals for oceans and marine and coastal ecosystem-based management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 8139-8147.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2019

CONTENTS