

王黛瑶, 蔡姗姗, 王成坤. 基于文献计量分析的城市雨洪管理研究进展及热点演进[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 27–38, 44.

WANG D Y, CAI H H, WANG C K. Research progress and hotspot evolution of urban stormwater management based on bibliometric analysis [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 27–38, 44.

基于文献计量分析的城市雨洪管理研究进展及热点演进

王黛瑶, 蔡姗姗, 王成坤*

(中国城市规划设计研究院深圳分院, 广东深圳 518000)

摘 要 为探究城市雨洪管理领域的研究进展及热点演进, 采用 CiteSpace 软件和 Fisher-Pry 模型对 Web of Science 核心数据库中 2010 年—2023 年的 15 249 篇城市雨洪管理论文进行发文数量分析、技术成熟度分析、期刊双图叠加分析、期刊共被引分析、国家合作分析以及关键词聚类及突现分析等可视化研究。研究表明, 城市雨洪管理领域论文发文量可划分为增速缓慢(2010 年—2012 年)和波动上升(2013 年—2023 年)2 个阶段。此领域研究当前仍处于高速发展阶段, 预计在 2056 年相关技术将完全成熟, 在未来二三十年间仍具有较大的发展潜力和研究空间。此外, 城市雨洪管理领域的研究呈现多学科交叉的趋势。我国在该领域发文量位居全球第 2 且学术影响力较大, 但论文质量还有待进一步提升。气候变化、重金属、绿色基础设施和水质是城市雨洪管理领域 4 个研究方向。研究热点可划分为水环境治理阶段(2010 年—2012 年)、内涝防治阶段(2013 年—2020 年)和新兴城市雨洪控制理念阶段(2021 年—2023 年), 表明城市雨洪管理领域研究逐渐向顺应自然、生态友好方向转变。

关键词 文献计量 城市雨洪管理 研究热点 CiteSpace 可视化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)12-0027-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.004

Research Progress and Hotspot Evolution of Urban Stormwater Management Based on Bibliometric Analysis

WANG Daiyao, CAI Huahua, WANG Chengkun*

(China Academy Urban Planning & Design Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract In order to explore the research progress and hotspot evolution in the field of urban stormwater management, CiteSpace software and Fisher-Pry model were used to analyze the number of published papers, technology maturity analysis, journal double map overlay analysis, journal co-citation analysis, national cooperation analysis, keyword clustering and emergence analysis of 15 249 urban stormwater management papers from 2010 to 2023 in Web of Science core collection database. The research shows that the number of papers published in the field of urban stormwater management can be divided into two stages including slow growth (from 2010 to 2012) and fluctuating rise (from 2013 to 2023). The research in this field is still in the stage of rapid development, and it is expected that the relevant technology will be fully mature in 2056, and there is still a large development potential and research space in the next two to three decades. In addition, the research in the field of urban stormwater management presents a multidisciplinary trend. China ranks second in the world in the number of papers published in this field and has greater academic influence, but the quality of papers needs to be further improved. Climate change, heavy metals, green infrastructure and water quality are the four research directions of urban stormwater management. Research hotspots can be divided into water environment governance stage (from 2010 to 2012), waterlogging prevention stage (from 2013 to 2020) and emerging urban stormwater control concept stage (from 2021 to 2023), indicating that research in the field of urban stormwater management has gradually changed to conform to nature and be eco-friendly.

Keywords bibliometrics urban stormwater management research hotspot CiteSpace visualization

[收稿日期] 2024-02-20

[作者简介] 王黛瑶(1997—), 女, 硕士, 研究方向为城市雨洪管理、市政基础设施规划与设计, E-mail: 942611850@qq.com。

[通信作者] 王成坤(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为城市水系及洪涝灾害防治研究, E-mail: wck@szcaupd.com。

近几十年来,全球人口数量急速增长,城市化水平快速提升。根据联合国的预测,到 2100 年,全球人口数量可达到 110 亿,超过 2/3 的人口将居住在城市^[1]。快速城市化导致城市内土地利用性质急剧改变、不透水地面面积持续扩大和地表污染物负荷迅速提高,增加雨水径流量和污染浓度,改变地表径流的水文特征^[2]。此外,受气候变化的影响,全球极端天气频发,短期暴雨的强度、出现频率和分布范围均呈上升趋势,使传统城市排水系统面临巨大考验^[3-4]。

为应对这一严峻挑战,城市雨洪管理理念和相应措施不断演进,从解决单一目标(减少洪水)逐渐转变为处理多个问题(洪涝问题、径流污染等)^[5]。可持续排水系统(sustainable urban drainage systems, SUDS)^[6]、最佳管理实践(best management practices, BMPs)^[7]、低影响开发(low impact development, LID)^[8-10]、水敏性城市设计(water sensitive urban design, WSUD)^[6,11]和海绵城市^[3,12]是当前各国采用的一系列城市雨水管理措施。BMPs 首次在 1972 年《清洁水法》中被提出,旨在控制雨水径流污染^[6]。LID 侧重通过巧妙的场地设计和绿色基础设施(雨水花园、透水路面、绿色屋顶等)从源头控制雨水,促进雨水径流的渗透、蒸发和过滤^[13]。WSUD 具有多重内涵,其控制目标包括洪水防治、流量调节、水质提升和雨水回用,强调通过城市规划和景观设计来管理雨水^[14]。我国于 2013 年提出“海绵城市”新型城市雨洪管理理念,旨在通过“源头减排、过程控制、系统治理”等措施使城市具备像海绵一样吸纳雨水的能力,提高城市韧性^[15]。

为帮助研究人员更深入了解城市雨洪管理研究的现状和未来趋势,有必要对已有研究成果进行系统分析。文献计量分析可用于探索领域热点研究主题,总结研究的演变趋势,形成全景知识网络结构^[16-18]。本文采用 CiteSpace 软件对城市雨洪管理研究领域进行文献计量分析,旨在回答下列问题:(1)2010 年至今,城市雨洪管理领域论文的年度发表数量和发展阶段如何;(2)哪些国家和期刊在城市雨洪管理领域具有较大影响力;(3)城市雨洪管理领域研究不同阶段的知识基础和研究热点是什么。以期为城市雨洪管理领域的相关研究提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究采用 Web of Science (WOS) 核心数据库的数据进行分析。WOS 数据库收录世界上 10 000 余本高质量、多学科、国际性的学术期刊,是全球最具学术权威的论文数据库^[19]。本研究以“城市雨洪管理”为关键词进行数据分析的论文检索,检索式为 TS = (urban stormwater management) OR TS = (urban storm water management),检索时间为 2010 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日。通过筛选和分类,共检索到相关文献 15 249 篇。为便于文献计量分析,获取的所有数据均保存为“纯文本”记录,记录内容选定为“全记录与引用的参考文献”。

1.2 研究方法

文献计量分析可定量评估某一领域的研究国家、机构、作者和期刊对该领域的贡献度,揭示知识领域的宏观结构和热点演进情况^[20]。本文采用 Microsoft Excel 软件对城市雨洪管理领域的论文总发文量、期刊发文量、国家发文量以及相应被引次数进行数据分析,并运用 Origin 软件对研究数据进行可视化处理,采用 Fisher-Pry 模型模拟分析城市雨洪管理领域研究的发展趋势^[21],应用 CiteSpace 6.2.R6 对研究领域进行宏观知识流分析,对发文期刊和研究国家等进行合作网络分析。最后,通过关键词聚类分析和突发分析,识别城市雨洪管理领域的研究热点和演进态势。

CiteSpace 是一款文献计量分析软件,通过获取数据库中大量论文数据,能够快速进行期刊双图叠加分析、共被引分析以及关键词聚类 and 突现分析等,全面展示领域内的研究趋势和热点话题,协助研究人员迅速准确地了解领域重点内容^[22]。Blondel 算法是 CiteSpace 中对研究领域内期刊聚类分析的一种方法。该算法由 Blondel 等^[23]于 2008 年提出,其原理为在短时间内通过初始化、迭代和收敛等过程识别大量数据之间的联系,并将数据模块化聚类,生成完整的聚类网络结构。在 CiteSpace 中,Z-Score 算法被用于合并分析相似引文。该算法通过计算 2 篇论文共同引用数量与各自被引用数量标准差的倍数(即 Z 值),衡量它们之间的相似度和联系紧密程度^[24]。CiteSpace 中的 Cosine 算法基于引文向量的

夹角余弦值来衡量论文之间的关联强度,并据此构建共引网络,识别领域内的核心文献和研究趋势^[25]。为提高网络可读性并突出关键节点,CiteSpace采用裁剪的方式对数据进行预处理。Minimum Spanning Tree和Pathfinder Network是2种常用的裁剪方法。Minimum Spanning Tree是一种图论算法,通过保留所有节点并裁剪连接强度较弱的边来实现。此方法通常用于去除那些连接节点但对网络核心结构影响不大的边,以便更清晰地展示网络的核心结构^[26]。Pathfinder Network是一种基于路径计数和筛选的网络裁剪方法,通过计算每个节点在网络中的最短路径数量,保留具有较多最短路径密度的节点和边。该方法有助于识别和保留网络中的关键节点和路径,从而更有效地揭示网络的结构和功能^[26]。

2 结果和讨论

2.1 城市雨洪管理领域论文研究趋势分析

2.1.1 论文类型与年度发文数量分析

论文发表数量是反映某一领域研究发展趋势的

重要指标^[27]。以“城市雨洪管理”关键词对WOS核心数据库进行检索,2010年—2023年该领域共发表论文15 249篇,其中研究论文13 317篇、会议论文1 054篇、综述论文753篇、其他125篇。

如图1所示,2010年—2023年城市雨洪管理领域全球发文量呈持续上升趋势,表明近年来该领域一直备受关注。根据年度发文数量,此领域研究可被划分为2个阶段。第一阶段为2010年—2012年,发文量增长缓慢且基本保持不变,平均年发文量约600篇。第二阶段为2013年—2023年,在全球气候变化愈发剧烈、极端天气频繁出现的背景下,城市雨洪管理领域论文发文量呈现波动上升趋势,年发文量从775篇(2013年)增长到最多的1 710篇(2021年)。值得注意的是,2016年和2021年论文发表数量存在两次突增现象,这可能是由于2014年政府间气候变化专门委员会(IPCC)发表《第五次评估报告》以及2021年召开第26届联合国气候变化大会(COP26),引起了全社会对城市雨洪管理研究重要性的高度关注^[14,28-29]。

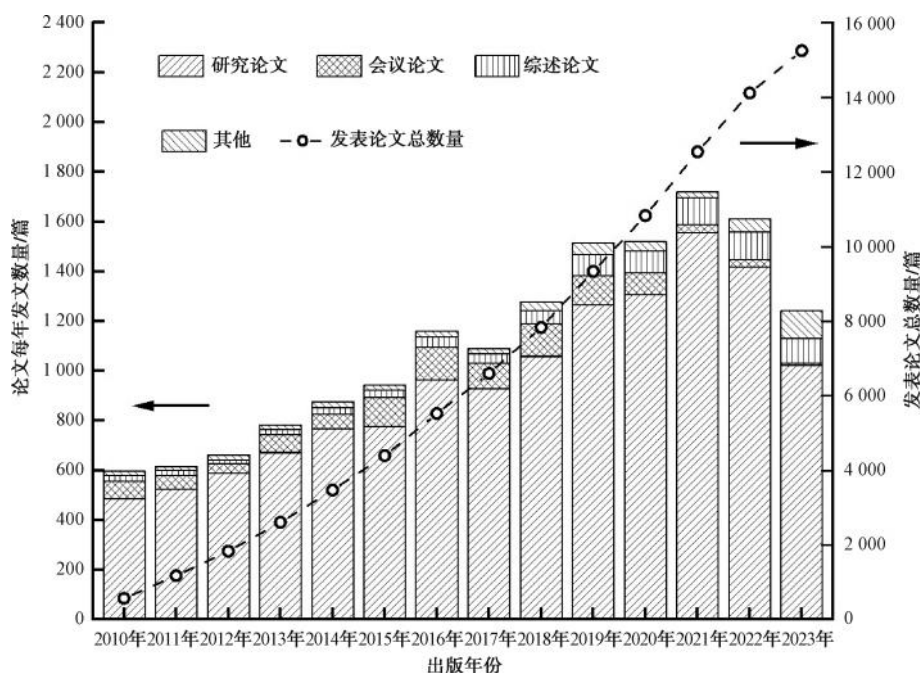


图1 2010年—2023年城市雨洪管理领域论文全球发文量及论文类型

Fig. 1 Global Quantity and Categorization of Papers on Urban Stormwater Management from 2010 to 2023

2.1.2 论文发展阶段及技术成熟度分析

Fisher-Pry模型可用于预测一项技术的生命周期和成熟度,也被称为Fisher-Pry分析和Fisher-Pry

扩散模型。作为Logistic模型的一种变式,其表达式如式(1)^[21]。Fisher-Pry模型通过假定一项技术在某时刻成长达到饱和,以模拟该技术在发展过程中

的技术成熟度。

$$\frac{Y}{L-Y} = 10^{A-Bt} \quad (1)$$

其中: Y ——技术累计发文数量;
 t ——技术论文出版年份;
 L ——技术成长饱和值;
 A ——技术开始成长的起始值;
 B ——技术随时间的成长速率。

在取值方面,参数 Y 和 t 是通过 WOS 核心数据库进行论文检索分析后手动输入模型的数据;参数 L 为确定性常数(100%),反映技术成长的

最大潜力;参数 A 和 B 均为模型自动计算得出的模型参数,用以定量描述技术随时间的成长趋势。

通过 Fisher-Pry 模型模拟,城市雨洪管理领域研究正处于快速发展阶段,并预计在 2035 年前将继续保持快速增长态势[图 2(a)]。城市雨洪管理相关技术的成熟度从 2006 年的 10% 提升至 2023 年的 50%,预计到 2040 年将达到 90%,并有望在 2056 年完全成熟[图 2(b)]。这表明在未来二三十年内,城市雨洪管理领域仍具备较大的发展潜力和广阔的研究空间。

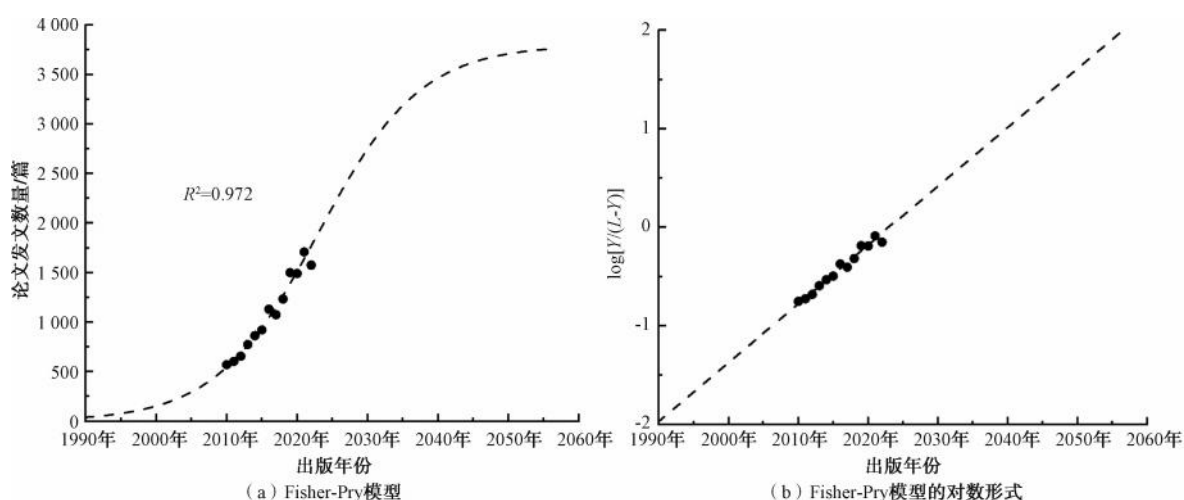


图2 城市雨洪管理领域技术成熟度分析

Fig. 2 Technology Maturity Analysis for Urban Stormwater Management

2.1.3 论文研究领域宏观知识流分析

CiteSpace 软件的双图叠加分析模块能够展示城市雨洪管理研究领域中文期刊分布、被引论文轨迹以及研究重心漂移等关键信息。该模块利用 Blondel 算法对领域内的研究期刊聚类,包含施引图(图3左侧)和被引图(图3右侧)两部分^[30]。施引图展示施引论文所在的期刊分布范围和相关学科领域,而被引图则呈现被引论文涉及的期刊分布范围和主要被引学科。前者揭示城市雨洪管理的应用领域,后者则反映该领域的研究基础。图中的椭圆表示对应期刊的主体范围,横轴代表作者数量,纵轴表示发表论文数量。施引图和被引图之间相连曲线为引证连线,全面反映左侧期刊对右侧期刊的引用关系。

通过 Z-Score 算法对引证连线进行合并,以便更简洁地呈现出施引期刊和被引期刊之间的引证关

系,结果如图3所示。城市雨洪管理领域显现7条明显引用轨迹:(1)生态学、地球学、海洋科学→地球学、地质学、地球物理学;(2)生态学、地球学、海洋科学→植物学、生态学、动物学;(3)生态学、地球学、海洋科学→环境学、毒理学、营养学;(4)生态学、地球学、海洋科学→经济学、经济、政治学;(5)兽医学、动物学、科学→地球学、地质学、地球物理学;(6)兽医学、动物学、科学→植物学、生态学、动物学;(7)兽医学、动物学、科学→环境学、毒理学、营养学。以蓝色引用轨迹为例,生态学、地球学、海洋科学的相关论文研究至少基于右侧4个相关学科,表明城市雨洪管理领域研究呈现出多学科交叉趋势。

城市雨洪管理领域的研究主要引用“地球学、地质学、地球物理学”“植物学、生态学、动物学”“环境学、毒理学、营养学”和“经济学、经济、政治学”4

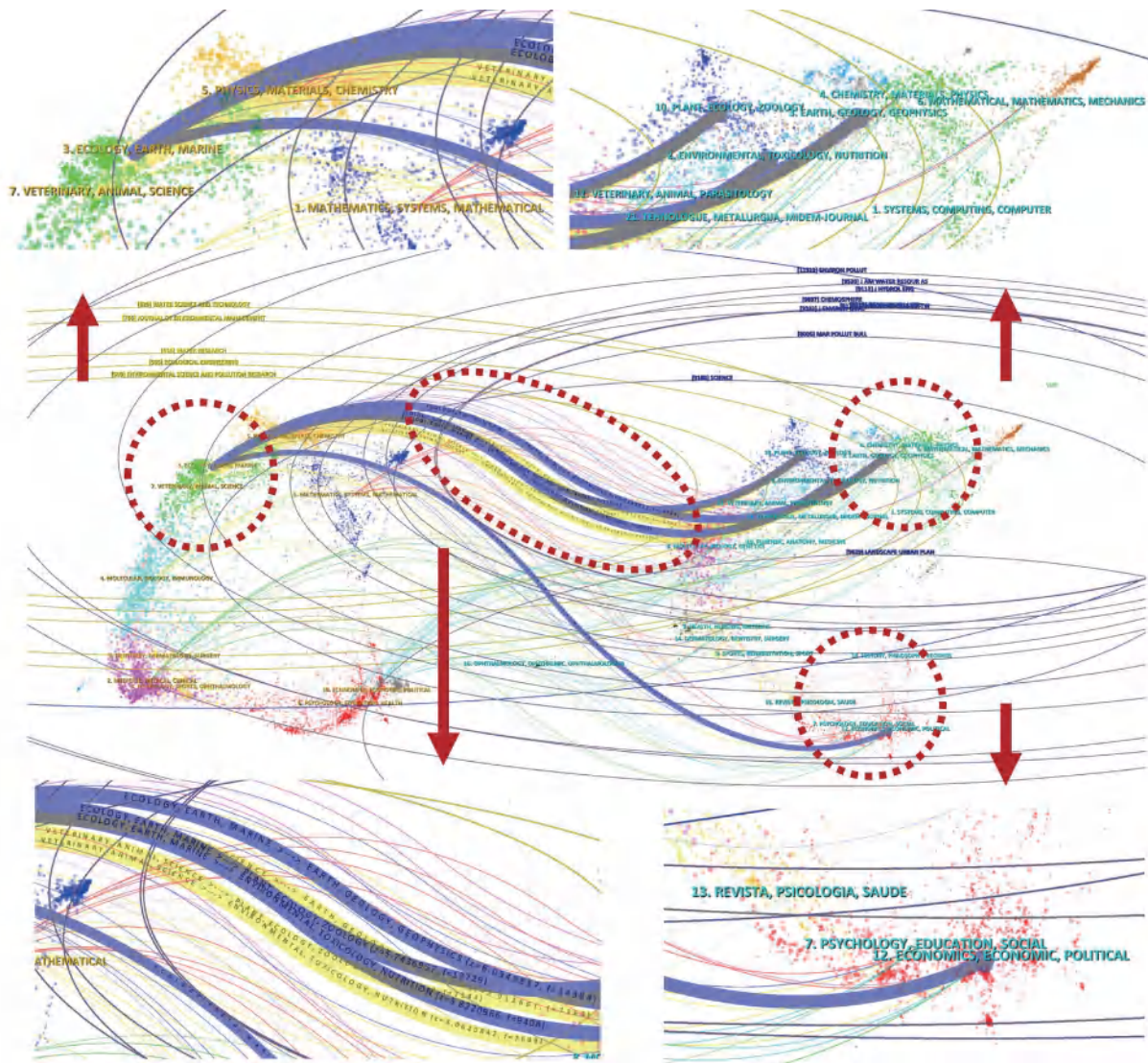


图3 城市雨洪管理领域研究期刊双图叠加分析

Fig. 3 Research Journals for Double Map Superposition Analysis of Urban Stormwater Management

个学科作为研究基础(图3右侧)。在这4个学科中,刊载相关研究论文数量排名前5的期刊分别是 *Water Research*、*Environmental Science & Technology*、*Water Resources Research*、*Water Science and Technology* 和 *Hydrological Processes*。上述相关研究成果已应用于“生态学、地球学、海洋科学”和“兽医学、动物学、科学”学科领域(图3左侧)。*Science of the Total Environment*、*Water Science and Technology*、*Journal of Environmental Management*、*Water Research* 和 *Ecological Engineering* 是这2个学科中发文数量前5的期刊。上述研究表明,城市雨洪管理除与环境、生态、地质和植物等领域相关以外,还与政治经济和社会发展密切相关。具体而言,在政治方面,城市雨洪

管理需要政府进行顶层决策并出台相应的法律法规,以确保管控的规范性和持续性。在经济方面,城市雨洪管理需投入大量资金用于修建和维护雨水管网、泵站等关键控制设施。在社会发展方面,公众的认知水平和参与程度对推动城市雨洪管理具有关键作用,并且快速城市化进程亦提高了社会对此部分的关注度。

2.2 城市雨洪管理领域论文研究要素分析

2.2.1 发表期刊分析

(1) 发文量与被引量

通过分析 WOS 核心数据库文献检索结果,在表1中汇总发表城市雨洪管理相关论文数量前10的期刊。*Science of the Total Environment* 刊登919篇与

该领域相关的文献,是发文量最高的期刊。该期刊是一本国际性多学科的自然科学期刊,主要发布环境领域具有创新性和影响力的研究成果,涵盖大气、岩石圈、水圈和生物圈等领域。*Water Research* 篇均被

引频次(46次)和期刊影响因子(12.8)均最高,表明期刊在城市雨洪管理领域具有较大影响力。*Water Research* 是一本水研究领域的权威期刊,内容涉及全球水循环、污水处理以及水文循环等多个领域。

表 1 城市雨洪管理领域发表论文数量排名前 10 的期刊
Tab. 1 Top 10 Journals in the Field of Urban Stormwater Management of Published Papers

排名	期刊	论文数量/篇	总被引频次/次	篇均被引频次/次	2022 年影响因子
1	<i>Science of the Total Environment</i>	919	28 259	31	9.8
2	<i>Water</i>	703	9 843	14	3.4
3	<i>Journal of Hydrology</i>	558	18 760	34	6.4
4	<i>Water Science and Technology</i>	420	5 608	13	2.7
5	<i>Journal of Environmental Management</i>	396	10 988	28	8.7
6	<i>Water Research</i>	318	14 598	46	12.8
7	<i>Ecological Engineering</i>	289	8 138	28	3.8
8	<i>Sustainability</i>	279	3 162	11	3.9
9	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	263	3 965	15	5.8
10	<i>Atmospheric Environment</i>	221	6 372	29	5.0

注:影响因子来源于 2022 年科睿唯安发布的 *Journal Citation Reports*。

(2)期刊共被引分析

期刊共被引分析用于展示特定领域的知识来源分布、引用期刊名称以及期刊之间关联性。此外,通过期刊共被引分析还可揭示期刊的发文质量。在 CiteSpace 中,节点类型选择“Cited Journal”,各时间切片阈值为“Top1”,网络连接强度计算选用“Cosine”算法并选用“Pathfinder + Pruning sliced networks+Pruning the merged network”剪裁方法进行聚类分析。城市雨洪管理领域的期刊被聚类为由 96 个节点和 100 个连线的共被引网络(图 4)。Modularity Q 是网络模块化程度的评价指标,取值范围为[0,1],该值越接近 1,聚类效果越好。Mean Silhouette 用于衡量聚类同质性,取值为[-1,1],该值越接近 1,聚类主题越清晰、可信度越高。期刊聚类的 Modularity Q 值为 0.816 3,说明网络的聚类效果较好;Mean Silhouette 值为 0.926 0,表明聚类结果可靠性较高。中介中心性作为衡量节点重要性的指标,常以紫色圆环显示。此外,圆环的厚度还反映了中介中心性的大小。紫色圆环越厚,中介中心性越高,节点的重要性也越大。由图 4 可知,*Science of the Total Environment* 的紫色圆环最厚、中介中心性最高(1.40),其次是 *Environmental Pollution* 和 *Atmospheric Environment*,中介中心性分别为 0.96 和

0.80。

如表 1 所示,*Science of the Total Environment*、*Journal of Hydrology* 和 *Water Research* 是城市雨洪管理领域被引次数最多的 3 种期刊。除 *Science of the Total Environment* 以外,其他期刊的被引次数与中介中心性不成正比,即使期刊的被引次数很高,也并不直接说明该期刊的学术影响力大。由此可见,研究人员应更关注在学术界具有影响力的权威期刊,以获得更有价值的研究论文。

2.2.2 研究国家分析

(1)发文量与被引量

2010 年—2023 年,全球共有 162 个国家发表城市雨洪管理领域相关论文(图 5)。在 CiteSpace 中,节点类型选择“Country”,各时间切片阈值为“Top10”,网络连接强度计算选用“Cosine”算法并选用“Pathfinder+Pruning sliced networks + Pruning the merged network”剪裁方法进行聚类分析。城市雨洪管理领域的研究国家被聚类为一个由 13 个节点和 12 个连线组成的共被引网络[图 5(a)]。表 2 列出了在此期间发表论文数量排名前 10 的国家、发文量和总被引频次,并计算各个国家篇均被引频次和中介中心性。美国是城市雨洪管理研究领域最活跃的国家,以 5 808 篇论文位居榜首,占全球总发文量

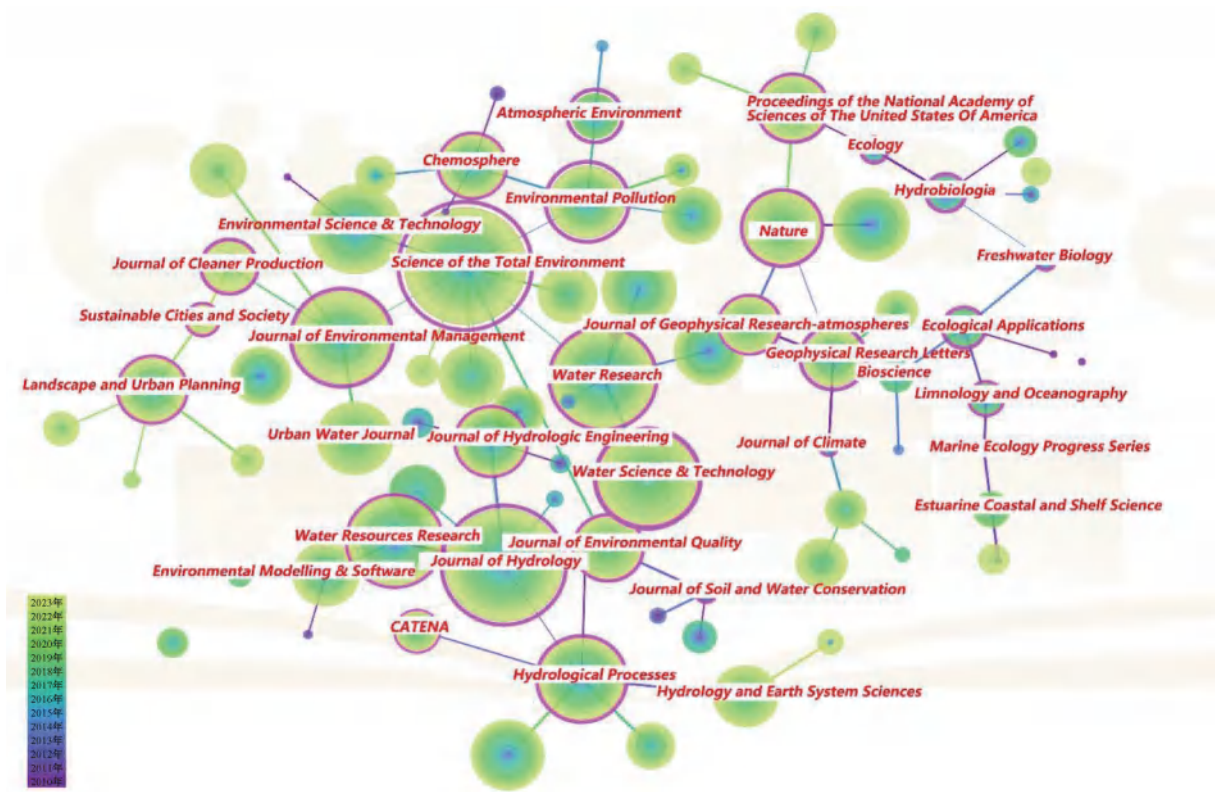


图 4 城市雨洪管理领域相关期刊共被引分析图

Fig. 4 Co-Cited Analysis of Journals Related to Urban Stormwater Management

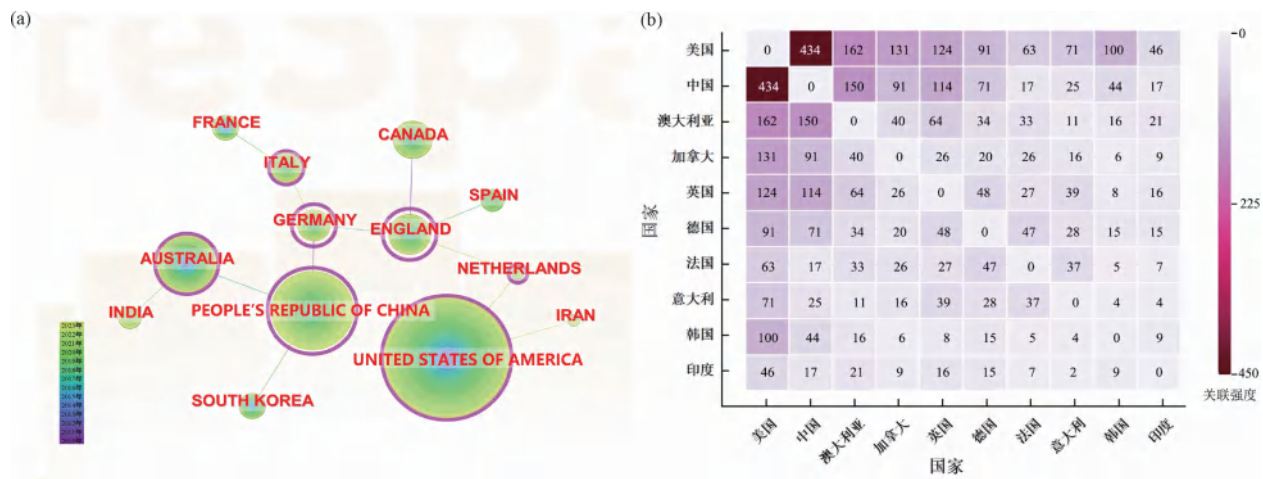


图 5 (a)城市雨洪管理领域国家合作网络图和(b)城市雨洪管理领域国家合作关联强度热力图

Fig. 5 (a)Countries Cooperation Network in Urban Stormwater Management and (b) Intensity Heat Map of National Cooperation in Urban Stormwater Management

的 38.08%。中国(2 607 篇)、澳大利亚(1 404 篇)、加拿大(855 篇)和英国(847 篇)紧随其后,在此领域的发文占比分别为 17.10%、9.21%、5.61%和 5.55%。值得关注的是,英国以其高达 35 次的篇均被引频次和 1.27 的中介中心性位居

首位,表明其所发论文对学术界产生重要影响并在该领域扮演关键角色。中国的中介中心性(0.88)排名第 2,表明中国在该领域具备较大学术影响力,但篇均被引频次较低,暗示着论文质量还有待进一步提升。

表 2 城市雨洪管理领域发表论文数量排名前 10 的国家

Tab. 2 Top 10 Countries of Published Papers in the Field of Urban Stormwater Management

排名	国家	发文数量/篇	总被引频次/次	篇均被引频次/次	中心性
1	美国	5 808	130 867	23	0.53
2	中国	2 607	54 885	21	0.88
3	澳大利亚	1 404	43 893	31	0.33
4	加拿大	855	21 456	25	0.05
5	英国	847	29 439	35	1.27
6	德国	612	15 724	26	0.15
7	法国	539	14 679	27	0.07
8	意大利	533	15 913	30	0.05
9	韩国	490	9 129	19	0.02
10	印度	425	7 432	17	0.01

(2) 合作关系分析

选取城市雨洪管理领域发文量前 10 国家之间的关联强度作图,如图 5(b)所示。美国和中国之间合作的关联强度远超其他国家,表明两国在此领域合作密切。鉴于我国在城市雨洪管理领域起步较晚,为借鉴发达国家的先进经验,我国还与澳大利亚、加拿大、英国和德国等国紧密沟通交流,在雨洪管理理念、水利水文模型、制度法规文件等方面发展取得积极成效^[3,12,31]。

2.3 城市雨洪管理领域论文研究热点分析

2.3.1 关键词聚类分析

关键词代表论文的核心内容,准确反映研究领域的发展方向。通过构建关键词共现网络,清晰地呈现研究重点与研究主题之间的相关关系^[32-33]。节点越大,关键词词频越高,主题热度越大。在 CiteSpace 中,节点类型选择“Keyword”,各时间切片阈值为“Top10”,网络连接强度计算选用“Cosine”算法并选用“Minimum Spanning Tree + Pruning sliced networks + Pruning the merged network”剪裁方法进行聚类分析。城市雨洪管理领域相关关键词被聚类为一个由 117 个节点和 51 个连线组成的共被引网络(图 6)。

关键词聚类所得 Modularity Q 值达到 0.833 9,表明网络的聚类效果显著;Mean Silhouette 值为 0.709 7,进一步验证了聚类结果的可靠性。

如图 6 所示,“雨洪控制”是最常见的关键词,自 2010 年以来每年出现约 125 次,与“LID”“体系”和“修复”等关键词密切相关,表明城市雨洪控制理

念十分注重生态友好性和可持续性^[34]。中介中心性最高的关键词为“性能”(中介中心性数值为 1.2)。它与“雨水径流”“减缓”和“水质”等词相关联,表明此领域研究注重实际,可通过控制的雨洪径流量和污染物去除效果来评估雨洪管理措施的适用性^[6]。

图 7 为城市雨洪管理领域关键词聚类分析时间轴可视化图,清晰展示每个聚类中重点关键词的演变时间和更替名称,辅助研究人员深入了解相关领域的发展进程。采用 CiteSpace 对城市雨洪管理领域关键词进行聚类分析,提取出“气候变化”“重金属”“绿色基础设施”和“水质”4 个聚类(表 3)。聚类#0(气候变化)和#2(绿色基础设施)内部的关键词联系较紧密,4 个聚类之间的关键词存在交叉联系。聚类#0(气候变化)采用对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)算法提取出“海平面上升”“风暴潮”和“降雨”等高频关键词,表明城市雨洪管理主要应对由气候变化所引起的洪水和降雨径流^[35]。聚类#1(重金属)相较于聚类#0(气候变化)在研究领域存在时间更长,说明重金属相关研究持续受到关注。聚类#1(重金属)中高频关键词包括“雨水径流”“渗透”“多环芳烃”和“悬浮颗粒”等,表明通过渗透等物理手段吸附雨水中的重金属和有机污染物是该集群的核心主题^[36]。聚类#2(绿色基础设施)侧重于关注城市雨洪控制方法,提取了如“LID”“城市雨洪控制”“基于自然的解决方案”和“生态系统服务”等关键词。由关键词演替曲线可知,城市雨洪管理理念逐渐向顺应自然、生态友好方向转

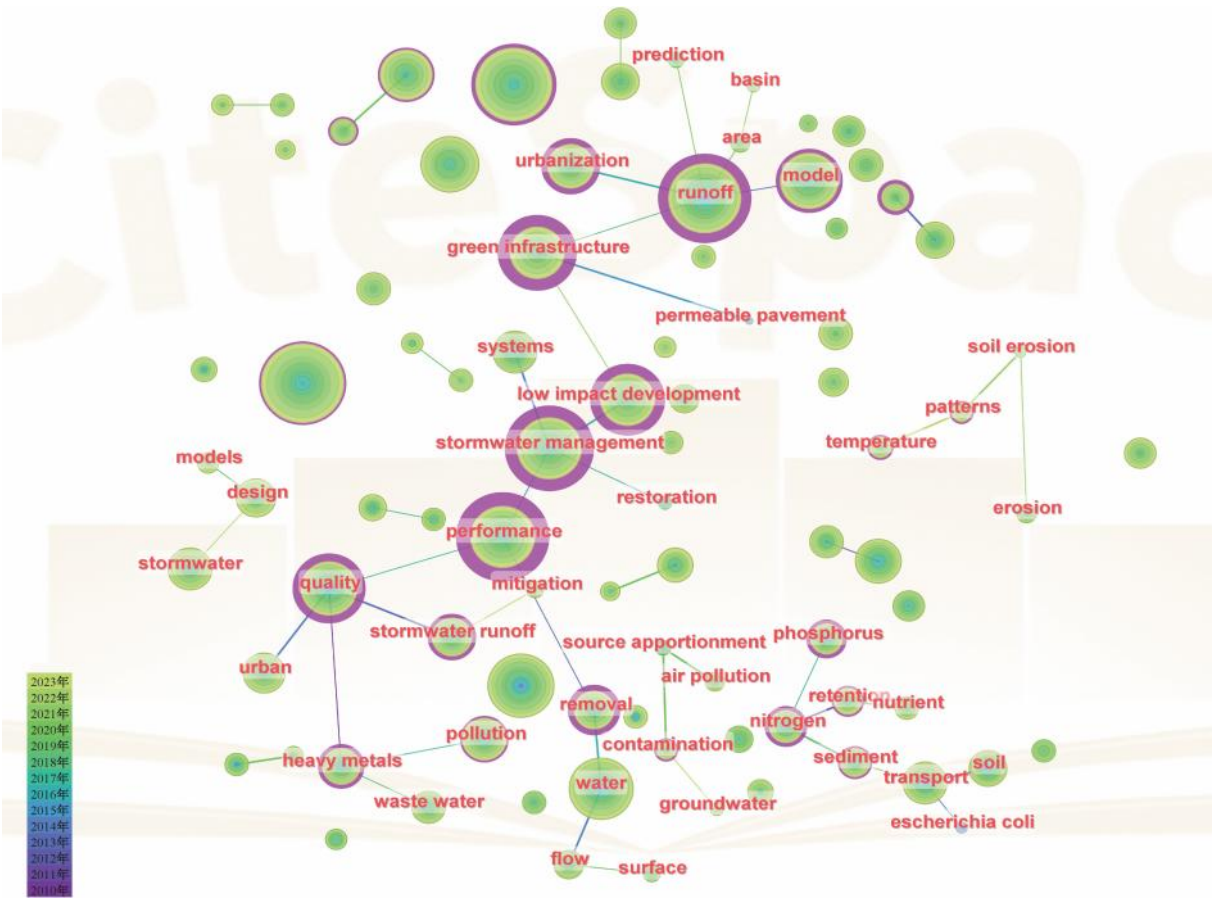


图 6 城市雨洪管理领域关键词共现网络图

Fig. 6 Keyword Co-Occurrence Network Map in Urban Stormwater Management

表 3 城市雨洪管理领域关键词聚类分析

Tab. 3 Cluster Analysis of Keywords in Urban Stormwater Management

聚类编号	聚类平均出现年份	关键词
0	2014 年	climate change; sea level rise; storm surge; impacts; rainfall
1	2012 年	heavy metals; stormwater runoff; infiltration; polycyclic aromatic hydrocarbons; particulate matter
2	2015 年	green infrastructure; urban stormwater management; low impact development; nature-based solutions; ecosystem services
3	2012 年	water quality; phosphorus; nitrogen; stormwater runoff monitoring; climate change

变^[9]。聚类#3(水质)提取出高频关键词为“磷”“氮”和“雨水径流监测”等,主要探讨如何通过城市雨洪管理方法减少极端天气情况下雨水中氮磷等物质含量,并采取雨水径流监测系统对此类物质进行监测,以提升雨水水质^[12]。

2.3.2 关键词突现分析

突现关键词是指在特定时间段内研究频率变化较为显著的词,反映该阶段的研究趋势^[33]。关键词的突发强度越高,表明此时间段内受到关注程度愈

大,代表研究领域的前沿和热点。图 8 为应用 CiteSpace 得出的城市雨洪管理领域 2010 年—2023 年突现关键词分析结果,柱形表示关键词出现的时间范围,柱形颜色深浅则体现了关键词的突发强度。根据关键词突现分析,城市雨洪管理领域的发展可划分为 3 个阶段。在初始阶段(2010 年—2012 年),突现关键词包括“径流”“洪水”“水质”等,表明早期城市雨洪管理致力于减少雨水中重金属、氮、磷等径流污染物,专注于水环境治理^[37]。此外,对

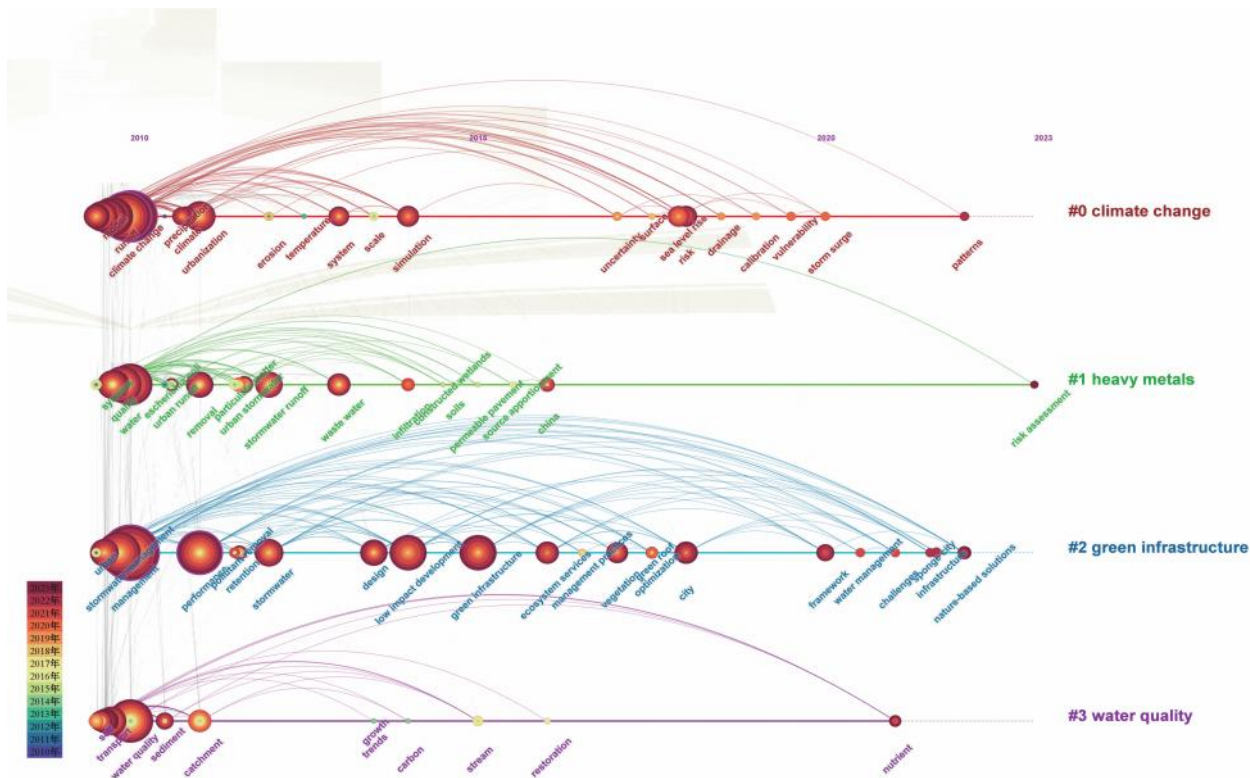


图 7 城市雨洪管理领域关键词聚类分析时间轴图
Fig. 7 Timeline Visualization of the Cluster Analysis of Keywords in Urban Stormwater Management

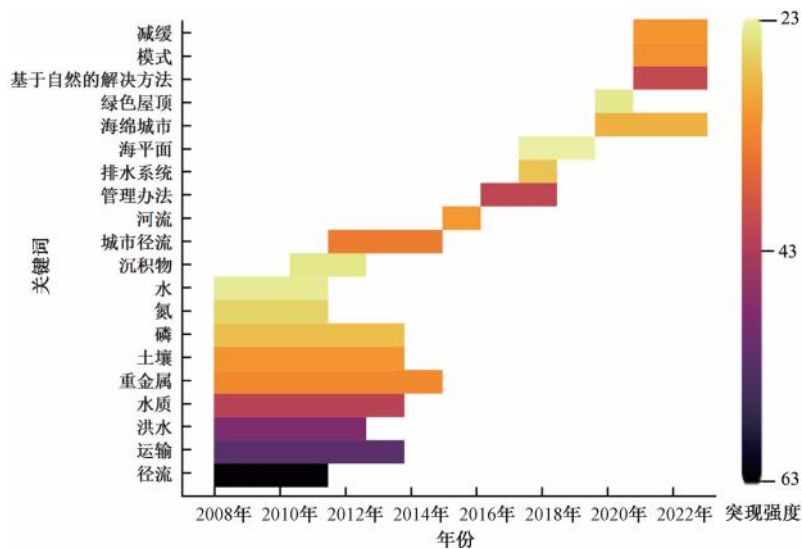


图 8 城市雨洪管理领域关键词突现分析
Fig. 8 Keywords Burst Analysis Chart in Urban Stormwater Management

洪涝灾害的讨论大多集中在洪水问题,对内涝的探讨较少^[14]。在第二阶段(2013 年—2020 年),新兴关键词如“城市径流”“海平面”“排水系统”等成为焦点。随着全球气候变化不断加剧以及城市化速度加快,内涝问题日益凸显,成为新阶段的研究热

点^[13,38]。此时,针对城市雨洪管理体系的研究掀起高潮。随着 LID、SUDS 和 WSUD 等基于自然的城市雨洪控制理念不断发展,在第三阶段(2021 年—2023 年)基于“绿色屋顶”“减缓”“基于自然的解决方法”等关键词的小尺度雨洪控制理念成为重

点^[39]。同时,我国的海绵城市理论也在全球范围内引起广泛关注^[12-13]。

3 结论

通过 CiteSpace 软件和 Fisher-Pry 模型对 2010 年—2023 年 WOS 核心数据库中“城市雨洪管理”的相关论文进行发文数量分析、技术成熟度分析、期刊双图叠加分析、期刊共被引分析、国家合作分析、关键词聚类分析和关键词突现分析等可视化研究,得出以下结论。

(1)研究趋势:从发文数量来看,城市雨洪管理领域研究可被划分为两个阶段。第一阶段为 2010 年—2012 年,发文量增长缓慢且基本保持不变。第二阶段为 2013 年—2023 年,发文量呈现波动上升趋势,表明该领域近年来持续受到关注。根据 Fisher-Pry 模型预测,当前城市雨洪管理领域研究仍处于高速发展阶段,且在 2035 年前保持快速增长态势。预计在 2056 年该领域技术将完全成熟,在未来二三十年间仍具有较大的发展潜力和研究空间。通过期刊双图叠加分析,城市雨洪管理领域研究呈现多学科交叉的趋势。除了与传统意义上相关的环境、生态和地质等领域相关以外,还与政治经济和社会发展密切相关。

(2)研究要素:从发文期刊来看, *Science of the Total Environment* 的发文量最多,而 *Water Research* 的篇均被引频次和期刊影响因子最高。通过 CiteSpace 期刊共被引分析,影响力排名前 3 的期刊依次为 *Science of the Total Environment*、*Environmental Pollution* 和 *Atmospheric Environment*。值得注意的是,除 *Science of the Total Environment* 以外,其他期刊的被引次数与中介中心性不成正比。即使期刊的被引次数很高,也并不直接说明该期刊的学术影响力大。在研究国家方面,美国、中国和澳大利亚的发文量位居前 3,而英国的篇均被引频次和中介中心性最高。中国在该领域的学术影响力较大,但论文质量还有待进一步提升。鉴于我国在城市雨洪管理领域起步较晚,为借鉴发达国家的先进经验,我国与美国、澳大利亚和加拿大等密切交流合作,在雨洪管理理念、水利水文模型、制度法规文件等方面发展取得积极成效。

(3)研究热点:通过关键词共现网络分析,“雨洪控制”是最常见的关键词,自 2010 年以来每年约

出现 125 次,与“LID”“体系”和“修复”等关键词密切相关,表明城市雨洪控制理念十分注重生态友好性和可持续性。采用关键词聚类分析,提取出“气候变化”“重金属”“绿色基础设施”和“水质”4 个研究方向。根据关键词突现分析,研究热点可被划分为基于“径流”“洪水”“水质”关键词的水环境治理阶段(2010 年—2012 年)、基于“城市径流”“海平面”“排水系统”关键词的内涝防治阶段(2013 年—2020 年)和基于“海绵城市”“减缓”“基于自然的解决方法”关键词的新兴城市雨洪控制理念阶段(2021 年—2023 年),城市雨洪管理理念逐渐向顺应自然、生态友好方向转变。

参考文献

- [1] NAZARPOUR S, GNECCO I, PALLA A. Evaluating the effectiveness of bioretention cells for urban stormwater management: A systematic review[J]. *Water*, 2023, 15: 913. DOI: 10.3390/w15050913.
- [2] WALSH C J, ROY A H, FEMINELLA J W, et al. The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706–723. DOI: 10.1899/04-028.1.
- [3] LI F R, ZHANG J F. A review of the progress in Chinese sponge city programme: Challenges and opportunities for urban stormwater management[J]. *Water Supply*, 2021, 22: 1638–1651. DOI: 10.2166/ws.2021.327.
- [4] PRUDENCIO L, NULL S E. Stormwater management and ecosystem services: A review[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3). DOI: 10.1088/1748-9326/aaa81a.
- [5] OBROPTA C C, KARDOS J S. Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid approaches[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(6): 1508–1523.
- [6] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more -The evolution and application of terminology surrounding urban drainage[J]. *Urban Water Journal*, 2014, 12: 525–542. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- [7] STRECKER E W, QUIGLEY M M, URBONAS B R, et al. Determining urban storm water BMP Effectiveness[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127(3): 144–149.
- [8] HAGER J, HU G, HEWAGE K, et al. Performance of low-impact development best management practices: A critical review[J]. *Environmental Reviews*, 2019, 27(1): 17–42.
- [9] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development-A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 413–432. DOI: 10.

- 1016/j. scitotenv. 2017. 06. 254.
- [10] 周昕怡, 孙宏扬. 国外生态雨洪管理理念对我国海绵城市建设管控的启示与借鉴[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 367-371.
ZHOU X Y, SUN H Y. Enlightenment and reference of foreign ecological stormwater management concepts to China's sponge city construction and control [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 367-371.
- [11] BEECHAM S, RAZZAGHMANESH M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate[J]. Water Research, 2015, 70: 370-384. DOI: 10. 1016/j. watres. 2014. 12. 015.
- [12] JIANG Y, ZEVENBERGEN C, MA Y C. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy [J]. Environmental Science and Policy, 2018, 80: 132-143. DOI: 10. 1016/j. envsci. 2017. 11. 016.
- [13] 李静思, 周伟, 王添. 城市雨洪管理与系统应对研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(6): 166-171, 189.
LI J S, ZHOU W, WANG T. Research progress on urban storm flood management and system response [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(6): 166-171, 189.
- [14] 姜雨. 基于内涝灾害治理的西安市城市更新策略研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
JIANG Y. Study on urban regeneration strategy of Xi'an City based on waterlogging disaster control[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2022.
- [15] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 1-5.
CHE W, ZHAO Y, LI J Q, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Basic concepts and comprehensive goals[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1-5.
- [16] 李化雨, 吴珊, 侯本伟, 等. 基于 CiteSpace 软件的供水管网计算分区文献计量分析[J]. 净水技术, 2019, 38(9): 75-82.
LI H Y, WU S, HOU B W, et al. Bibliometric analysis of calculated partitioning method for water supply distribution system based on CiteSpace software[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(9): 75-82.
- [17] 王俊, 王家昌, 王海军, 等. 基于 CiteSpace 与 VOSviewer 的水库防洪调度中文文献可视化分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 64-67, 88.
WANG J, WANG J C, WANG H J, et al. Bibliometric analysis of chinese literature on reservoir regulation for flood control purposes using CiteSpace and VOSviewer[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(9): 64-67, 88.
- [18] 段海煦, 曾维华, 陈家军. 基于可视化分析的“生态、环境、资源”承载力研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 5031-5040.
DUAN H X, ZENG W H, CHEN J J. Study on the carrying capacity of "ecology, environment and resources" based on visualization analysis[J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 5031-5040.
- [19] ZHAO X B. A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization [J]. Automation in Construction, 2017, 80: 37-47. DOI: 10. 1016/j. autcon. 2017. 04. 002.
- [20] DONTU N, KUMAR S, MUKHERJEE D, et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines[J]. Journal of Business Research, 2021, 133: 285-296. DOI: 10. 1016/j. jbusres. 2021. 04. 070.
- [21] 葛亮. 基于专利信息分析的技术生命周期研究——以我国石墨烯制备技术为例[J]. 情报工程, 2015, 1(4): 58-64.
GE L. Research on technology life cycle based on patent information analysis—Taking method for manufacturing graphene of China as an example [J]. Technology Intelligence Engineering, 2015, 1(4): 58-64.
- [22] 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. DOI: 10. 1002/asi. 20317.
- [23] BLONDEL V D, GUILLAUME J, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of communities in large networks [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008. DOI: 10. 1088/1742-5468/2008/10/P10008.
- [24] GUIMERÀ R, SALES-PARDO M, AMARAL L. Classes of complex networks defined by role-to-role connectivity profiles [J]. Nature Physics, 2006, 3: 63-69. DOI: 10. 1038/nphys489.
- [25] ZHANG D, XU J, ZHANG Y, et al. Study on sustainable urbanization literature based on Web of Science, Scopus, and China national knowledge infrastructure: A scientometric analysis in CiteSpace [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121537. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2020. 121537.
- [26] CHEN C M, MORRIS S. Visualizing evolving networks: Minimum spanning trees versus pathfinder networks[C]. Seattle: IEEE Symposium on Information Visualization 2003, 2003.
- [27] GUO P, TIAN W, LI H, et al. Global characteristics and trends of research on construction dust: Based on bibliometric and visualized analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 37773-37789. DOI: 10. 1007/s11356-020-09723-y.
- [28] 徐金金, 沈煜纯. 英国气候政策新进展及其前景[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2023(6): 43-53.
XU J J, SHEN M C. The UK climate policy: New progress and prospects[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2023(6): 43-53.
- [29] SABRINA TAMICA DUMONT. 小岛屿发展中国家(SIDS)对气候变化的脆弱性和适应[D]. 上海: 上海外国语大学, 2022.
DUMONT S T. Vulnerability and adaptation to climate change in Small Island Developing States (SIDS) [D]. Shanghai: Shanghai International Studies University, 2022.

(下转第 44 页)

- chemistry[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(38): 16517–16526.
- [11] YUAN C, BAI C, ZHU K, et al. Metal-free boron-assisted Fe(Ⅲ)/peracetic acid system for ultrafast removal of organic contaminants; Role of crystalline nature and interfacial suboxide boron intermediates[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140049. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140049.
- [12] ZHOU H, ZHANG H, HE Y, et al. Critical review of reductant-enhanced peroxide activation processes; Trade-off between accelerated $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ cycle and quenching reactions[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 286: 119900. DOI: 10.1016/j.apcatb.2021.119900.
- [13] YANG S, HE C, XIE Z, et al. Efficient activation of PAA by FeS for fast removal of pharmaceuticals; The dual role of sulfur species in regulating the reactive oxidized species[J]. *Water Research*, 2022, 217: 118402. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118402.
- [14] HE M, LI W, XIE Z, et al. Peracetic acid activation by mechanochemically sulfidated zero valent iron for micropollutants degradation; Enhancement mechanism and strategy for extending applicability[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118887. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118887.
- [15] WANG J, WANG Z, CHENG Y, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) promoted sulfamethoxazole degradation in the Fe(Ⅲ)/peracetic acid process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 281: 119854. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119854.
- [16] TONG Y, WANG N, CHENG F, et al. CuS assisted Fe(Ⅲ)-induced peracetic acid activation for bisphenol A degradation; Significance of synergetic roles of copper and sulfur in enhanced Fenton-like process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487: 150510. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150510.
- [17] NIMAI S L, ZHANG H, WU Z L, et al. Efficient degradation of sulfamethoxazole by acetylene black activated peroxydisulfate[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(10): 2657–2660.
- [18] DUAN X G, SUN H Q, WANG S B. Metal-free carbocatalysis in advanced oxidation reactions[J]. *Accounts of chemical research*, 2018, 51(3): 678–687.
- [19] ZHAO H, REN Y, LIU C, et al. In-depth insights into Fe(Ⅲ)-doped $\text{g-C}_3\text{N}_4$ activated peracetic acid; Intrinsic reactive species, catalytic mechanism and environmental application[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132117. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132117.
- [20] NING R Y, DONG Y D, YANG S R, et al. Fe-N co-doped biochar derived from biomass waste triggers peracetic acid activation for efficient water decontamination[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134139. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134139.

(上接第 38 页)

- [30] CHEN C, LEYDESDORFF L. Patterns of connections and movements in dual-map overlays; A new method of publication portfolio analysis[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2014, 65(2): 334–351.
- [31] LASHFORD C, RUBINATO M, CAI Y, et al. SuDS & sponge cities; A comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(1): 213. DOI: 10.3390/su11010213.
- [32] LI Q, LONG R, CHEN H, et al. Visualized analysis of global green buildings; Development, barriers and future directions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118775. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118775.
- [33] CHEN C. Science mapping; A systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2017, 2: 1–40. DOI: 10.1515/jdis-2017-0006.
- [34] 魏依柯, 陈前虎. 国际视野下的可持续雨洪管理政策研究——基于美国、英国和中国的比较[J]. *国际城市规划*, 2023, 38(2): 1–9.
- WEI Y K, CHEN Q H. Study on sustainable stormwater management policies from the international perspective; The comparison of the US, the UK and China[J]. *Urban Planning International*, 2023, 38(2): 1–9.
- [35] HAO W, SOHN D, WAN D. Development and research regarding stormwater runoff management; Bibliometric analysis from 2001 to 2021[J]. *Buildings*, 2023, 13: 901.
- [36] MA W, ZHAO B, MA J. Comparison of heavy metal accumulation ability in rainwater by 10 sponge city plant species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(26): 26733–26747.
- [37] 王晗. 基于西安古城雨洪管理经验的曲江新区海绵城市规划研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- WANG H. Study on sponge city planning in Qujiang New District based on the experience of stormwater management in Xi'an ancient City[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [38] 刘发欣, 程文, 刘昕, 等. 海绵城市建设中低影响开发的应用及研究进展[J]. *净水技术*, 2022, 41(9): 18–25, 34.
- LIU F X, CHENG W, LIU X, et al. Research progress and application of low impact development in sponge city construction[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(9): 18–25, 34.
- [39] RENTACHINTALA L R N P, REDDY M, MOHAPATRA P K. Urban stormwater management for sustainable and resilient measures and practices; A review[J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85: 1120–1140. DOI: 10.2166/wst.2022.017.