



王倩,袁川,张亚峰,胡彦婷,唐强,郭立,蔡忠银,王一,刘琴,岳晓萍,高英浩,方伟伟,胡健. 基于文献计量分析的穿透雨空间异质性及时间稳定性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10):315-328.

WANG Qian, YUAN Chuan, ZHANG Yafeng, HU Yanting, TANG Qiang, GUO Li, CAI Zhongyin, WANG Yi, LIU Qin, YUE Xiaoping, GAO Yinghao, FANG Weiwei, HU Jian. Research progress of the spatial heterogeneity and temporal stability of throughfall based on bibliometric analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10):315-328.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.27

基于文献计量分析的穿透雨空间异质性及时间稳定性 研究进展

王倩¹ 袁川^{2*} 张亚峰³ 胡彦婷⁴ 唐强² 郭立⁵ 蔡忠银⁶
王一⁷ 刘琴⁸ 岳晓萍¹ 高英浩¹ 方伟伟⁹ 胡健¹⁰

- (1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 杭州 311300;
2. 西南大学 地理科学学院/重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715;
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;
4. 中南林业科技大学 生命与环境科学学院, 长沙 410004;
5. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 成都 610065;
6. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500;
7. 国际竹藤中心/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102;
8. 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044;
9. 河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明省部共建协同创新中心, 河南 开封 475001;
10. 西南民族大学 四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 成都 610041)

摘要 穿透雨空间异质性及时间稳定性是影响植被生态系统水养分资源有效性的重要生态水文过程, 目前缺乏对该领域进展的系统总结。本研究以“throughfall”、“spatial heterogeneity”、“temporal stability”等为主题词, 检索2000—2022年Web of Science数据库, 共筛选获得517篇文献, 采用CiteSpace和R软件Bibliometrix包, 从论文数量、研究热点、前沿趋势, 和发文国家、机构和学者及其合作关系展开计量分析。结果表明: 1) 全球穿透雨空间异质性及时间稳定性论文数量年均增长5.0%; 发文国家集中在美、中、德等少数国家(占论文总数的51.3%); 发文机构主要是中国科学院(6.8%); 关键学者为Levia DF(3.7%); 刊登期刊主要是*Journal of Hydrology*(12.8%)等; 研究区主要集中在湿润区(66.7%)和暖温带(49.7%)。2) 2000—2009年研究主要关注样地尺度穿透雨对土壤水养分的补给; 2010—2013年关注地表水文和冠层沉积物运移过程; 2014—2022年着重结合冠层截留、土壤蒸发和土壤水分动态的“冠层-地表-土壤”完整水文路径系统分析, 强调对时间稳定性的精准刻画。3) 我国该领域发文数量全球第2(83篇, 16.1%), 2011年后年均增长率高达49.7%, 然而2000—2022年年篇均引用仅16.9次, 在发文量前20位国家中排第16位。综上, 自2000年以来穿透雨时空特征研究取得重要进展, 我国在该领域成果增长尤为迅速, 但研究影响力亟待提升。在未来研究中需结合地球关键带水文过程深入分析穿透雨在“大气-植被-土壤连续体”中水养分耦合和污染物迁移中的重要作用, 以期深刻了解森林生态水文过程、格局和影响机制。

关键词 穿透雨; 时空格局; CiteSpace; Bibliometrix; 可视化分析

中图分类号 S715.2

文章编号 1007-4333(2024)10-0315-14

文献标志码 A

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901038); 西南大学科研启动项目(SWU-KR24003); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2022-2-4); 西南大学青年团队专项资金(SWU-XDJH202306)

第一作者: 王倩(ORCID: 0009-0000-0921-1523), 硕士研究生, E-mail: wq22085@stu.zafu.edu.cn

通讯作者: 袁川(ORCID: 0000-0003-0406-5111), 副教授, 主要从事冠层降水再分配及其植被生理生态响应研究, E-mail: yuanchuan03@163.com

Research progress of the spatial heterogeneity and temporal stability of throughfall based on bibliometric analysis

WANG Qian¹, YUAN Chuan^{2*}, ZHANG Yafeng³, HU Yanting⁴, TANG Qiang², GUO Li⁵,
CAI Zhongyin⁶, WANG Yi⁷, LIU Qin⁸, YUE Xiaoping¹, GAO Yinghao¹, FANG Weiwei⁹, HU Jian¹⁰

(1. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China;

2. School of Geographical Sciences/Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. College of Life and Environmental Sciences, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

5. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

6. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China;

7. International Centre for Bamboo and Rattan/Beijing Co-Built Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science & Technology, Beijing 100102, China;

8. School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

9. Key Research Institute of Yellow Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center of Henan Province, Henan University, Kaifeng 475001, China;

10. Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract The spatial variability and temporal stability of throughfall are essential ecohydrological phenomena shaping water and nutrient dynamics in vegetation ecosystems. Due to the lack of systematic summary of research progress in this field, a total of 517 papers published from 2000 to 2022 in the Web of Science database were obtained by taking ‘throughfall’, ‘spatial heterogeneity’, ‘temporal stability’, etc. as keywords. This study conducted the bibliometric analysis using CiteSpace and R software Bibliometrix package from the perspectives of literature amount, research hotspot and progress, and key countries, institutes, researchers and their collaborations on this field. The results indicate that: 1) The global average annual growth rate of academic papers was 5.0%. Mainly concentrated in the United States, China and Germany, which occupied 51.3% of the total. The key contributors were the Chinese Academy of Sciences (6.8%) and researcher Levia DF (3.7%), and the main journal published was *Journal of Hydrology* (12.8% of total papers). Most studies were conducted in humid (66.7%) and warm temperate (49.7%) zones. 2) From 2000 to 2009, the research focused on the plot scale, which emphasized the impact of throughfall on soil water and nutrient replenishment. From 2010 to 2013, attention shifted to surface hydrology and the intricate processes involved in transporting canopy sediment. From 2014 to 2022, studies addressed the holistic hydrological pathway connecting the canopy, surface and soil by incorporating observations of canopy interception, soil evaporation, and soil moisture dynamics and with explicit emphasis on the precise characterization of temporal stability. 3) China ranked the second globally in terms of the number of papers published (83, 16.1% of the total) with a notable annual growth rate of 49.7% since 2011. Despite high publication volume, the average citations per paper remained modest at 16.9 from 2000 to 2022. In terms of citation impact, China hold the 16th position globally. In summary, significant progress has been made in throughfall dynamics research since 2000, particularly in China. However, its research influence urgently needs to be improved. Future investigations should explore the pivotal role of throughfall in water, nutrient and pollutant transport within the intricate ‘atmosphere-vegetation-soil continuum’ of terrestrial hydrological processes. International collaboration is imperative for a profound understanding the intricate processes, patterns and influencing mechanisms of forest ecohydrology.

Keywords throughfall; spatiotemporal pattern; CiteSpace; Bibliometrix; visual analysis

降水是植被生态系统的重要水分来源^[1],经冠层拦截后部分降水以点输入形式集中汇入枝干基部(即树干茎流),或以面状输入形式分散汇入冠层下土壤(即穿透雨)^[2],其余降水未达地表便蒸发返回大气(即截留损失)^[3-5]。作为降水再分配最大组分的穿透雨占次降水量比例(以下简称“穿透雨比例”)高达 60%~85%^[6],可直接透过冠层空隙落至地表,也可在被冠层初次拦截后滴落或溅落,形成自由穿透雨和释放穿透雨^[7],从而携带大气悬浮物、冠层生物排泄物、植物分泌物等汇入土壤^[8-10],构成了植被生态系统水分、养分输入的重要途径^[11-12]。截留于冠层的部分降水由于气象条件和植被特征的共同作用,在冠层特定位置或聚集,使得该位置穿透雨量高于降水^[13];或耗散,造成该位置穿透雨量远小于平均值^[14],导致强烈的空间非均一性^[15-18]。李海防等^[19]、Sheng 等^[20]和 Carlyle-Mosesd 等^[18]均发现乔灌木冠层穿透雨量,随距树干距离增加而增加,表现出明显的空间异质性。若穿透雨空间异质性在一定时间内保持稳定,使得冠层下土壤肥力呈现相应的空间分布格局^[21-22],对土壤水养分补给^[23]、植物水分利用策略^[24]、坡面的资源分布特征^[25]、植被存活和繁殖^[26-27],乃至区域水量平衡将产生重要影响^[28-29]。

文献计量分析作为一种运用数学和统计学方法来阐明文献的数量关系、分布结构和变化趋势的研究手段,可为客观统计一定时间段内特定研究主题的文献信息提供量化工具。借助 CiteSpace^[30]、HistCite^[31]、R^[32]、RefViz^[33]、SATI^[34]、VOSviewer^[35]等可视化分析手段,将已有研究进展和现状以知识图谱方式直观呈现。其中,CiteSpace把研究领域概念化为研究前沿和知识基础之间的映射函数^[36],是得以广泛应用的文献计量分析软件。在功能上合并了关键点计算测量和可视化属性(如突变检测、中介中心性和异质网络分析、时区视图等)^[37],其新版本持续优化了关键词的共现网络、聚类网络和突现图谱等可视化^[38],增强了识别知识结构关键点的准确性,同时极大推进了对研究领域的标注、研究前沿的归纳,以及研究新趋势的及时识别等难点工作^[39]。

进入 21 世纪以来,大量已有研究基于观测探讨了典型生态系统代表性植物的穿透雨空间分布特征^[40-51]。Levia 等^[3]和 van Stan 等^[52]在全球尺度上对

其时间稳定性规律进行了对比分析,穿透雨空间异质性及其时间稳定性的影响机制研究得以在全球典型气候区^[23]、温度带^[40]、植被生活型^[53]、生态系统类型^[50]中深入开展。实际降雨过程中,植被特征和气象因子共同影响冠层对降水的拦截和再分配过程,难以单独区分二者影响,使得穿透雨时空分布特征的影响机制尤为复杂,需要综合考虑植被特征和气象因子的共同影响。降水量、雨强、风速等降水特征直接作用于穿透雨过程^[54],大气温度、湿度、饱和水汽压差、风速、风向等其他气象因子通过影响蒸发强度、起截留作用的冠层有效面积等方式间接影响穿透雨^[55];叶面积、冠幅、自组织结构、枝干角度等植被因子均可作用于截留过程,通过影响冠层的拦截效率影响穿透雨^[56]。尽管取得上述进展,极大的增进了对穿透雨过程、格局以及生态水文效应的深刻认识,但缺乏对穿透雨空间异质性及其稳定性研究领域的文献计量分析,无法准确识别研究热点及其趋势,不利于客观认识当前研究进展和系统归纳未来研究方向。因此,本研究拟以“Throughfall”、“Spatial heterogeneity”、“Temporal stability”为关键词,检索 2000—2022 年 Web of Science 数据库,对筛选获得的文献采用新版 CiteSpace 并辅之 R 软件 Bibliometrix 包,对该领域研究成果进行可视化分析,归纳热点、总结当前研究不足并提炼未来方向,以期厘清“植物-水分”关系的科学演化脉络,为穿透雨空间异质性及其时间稳定性的进一步研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究以科学引文索引数据库(Web of Science)为文献信息来源建立数据库,在其核心合集(Web of Science TM core collection)中,基于检索式“TS=(Throughfall) and (Spatial and Variability or Heterogeneity or Distribution or Pattern) or (Tempo* and Stability)”开展文献检索。设置检索时间段为 2000 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日,选择检索文献类型为“article”(即研究论文)和“review”(即综述论文),共得到以穿透雨空间异质性及其时间稳定性为主题的论文 517 篇,分别包含研究论文 473 篇和综述论文 12 篇。鉴于水分和温度对陆地植被生态系统的重要作用,本研究以年均降水量和月

均温为标准进一步统计基于不同干湿区和温度带的文献数据来源^[57]。参考年均降水量 ≤ 500 mm、500~800 mm和 >800 mm,分别划分干旱半干旱区、半湿润区和湿润区^[58-59]。按照柯本气候带分类标准,分别划分热带(最冷月气温 ≥ 18 $^{\circ}\text{C}$)、暖温带(最热月气温 >10 $^{\circ}\text{C}$,且最冷月气温 $0\sim 18$ $^{\circ}\text{C}$)、冷温带(最热月气温 >10 $^{\circ}\text{C}$,且最冷月气温 ≤ 10 $^{\circ}\text{C}$)和极地带(最热月气温 <10 $^{\circ}\text{C}$)^[60]。按文献中样地经纬度标记样地在不同干湿区和温度带的准确分布。如无明确标记,则以开展穿透雨试验的城市经纬度粗略标记,共整理得到412篇文献。其中,沿全球降水量梯度,湿润区研究275项占文献总数的66.7%,半湿润区和干旱半干旱区研究数量分别位居第2(81篇,19.7%)和第3位(56篇,13.6%)。排除开展于干带的34篇文献,沿温度梯度,暖温带研究约占当前穿透雨时空特征研究总量的一半(188篇,49.7%),其次为冷温带(125篇,33.1%)和热带(62篇,16.4%),而极地带研究不足1%(3篇,0.8%)。

1.2 研究方法

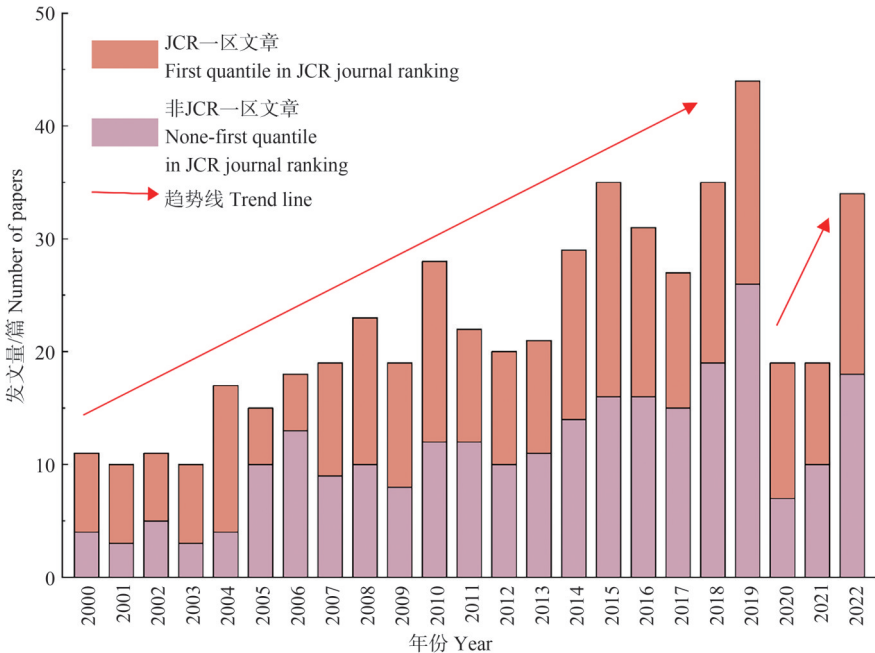
本研究采用CiteSpace(6.2 R4 Advanced)可分析穿透雨空间异质性及其时间稳定性研究领域的发文量和关键词年际变化,识别主要研究机构和团

队及其之间合作关系等^[67]。通过分别绘制关键词共现和聚类网络分析研究内容和热点,绘制关键词突现图谱以分析研究热点的逐年演化趋势。使用合作强度(即合著论文数量占论文总数的比例)表征合作研究广度,并采用CiteSpace绘制学者之间、研究机构之间的关系网络图谱以直观展示领域内的合作关系。此外,借助R软件(3.1.4)Bibliometrix包绘制学者发文量逐年趋势图谱^[62],并基于与外国合作发文数量与该国外文总量的比值量化了国家之间的合作强度。最后使用Origin Pro(2021)作图直观呈现该领域的国际合作关系及其合作程度、发文量的年际变化趋势,以及自2000年以来该领域的主要发文期刊及其排序。

2 结果与分析

2.1 研究成果年际趋势及重要发文期刊

穿透雨时空格局研究论文数量在2000—2022年的年际趋势见图1。可知:近23年该领域共发表Science Citation Index(SCI)收录论文517篇;依据2022年科睿唯安《期刊引用报告》(Journal Citation Reports)以论文分区粗略表征文章质量,发现一区论文(255篇)约占近23年发文总量的49.3%;文章



JCR 为科睿唯安《期刊引用报告》的缩写。

JCR stands for Journal Citation Reports by Clarivate.

图1 2000—2022年穿透雨时空格局研究论文数量年际趋势。

Fig. 1 Variation of annual publication on throughfall spatiotemporal characteristics from 2000 to 2022.

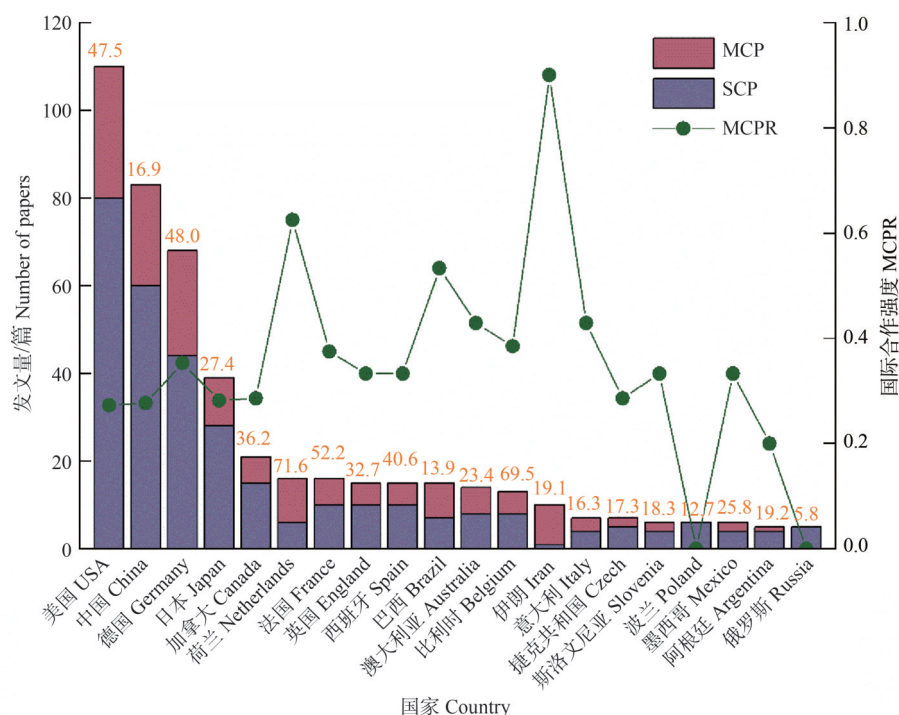
数量与质量总体呈逐年提高趋势,大致可分为2000—2019年平稳增长期和2020—2022年恢复增长期。转折年份为2019年,当年发文总量(44篇)和一区文章(26篇)均为近23年最高,2020年较前一年分别锐减56.8%和73.1%至19篇和7篇。明显的转折可能与2019年底爆发、2020年初开始肆虐全球的新型冠状病毒疫情有关,使得部分野外观测中断,对研究成果正常持续产出造成潜在的不利影响。总之,2000—2022年穿透雨时空格局研究的全球影响仍呈逐年增加趋势,文章总量以及其中的高质量研究成果的年均增长率分别为5.0%和6.8%。

近23年发表的相关领域研究成果涉及159本SCI收录期刊。虽然发文量前20位的期刊仅占期刊总数的12.6%,文章数量(315篇)所占比例却高达60.9%。*Journal of Hydrology*(66篇,12.8%)和*Hydrological Processes*(47篇,9.1%)发文量最多,*Agricultural and Forest Meteorology*和*Science of the Total Environment*(23篇,4.4%)并列第3位,*Ecohydrology*和*Forest Ecology and Management*

(19篇,3.7%)并列第5位,上述期刊发文量(197篇)接近论文总数的4成(38.1%)。由此可见,穿透雨时空格局研究成果主要集中在少数重要期刊,呈现高度集中的分布特征。

2.2 主要发文国家成果趋势及国际合作

2000—2022年穿透雨时空格局研究共涉及45个发文国家和地区,成果数量和质量的国家间差异巨大。美国(113篇)、中国(83篇)和德国(69篇)近23年论文数量共占全球同期发文总量的51.3%,日本(39篇)和加拿大(21篇)分列第4和第5位,其余国家发文量均低于20篇。在发展趋势上,较之美国、德国、日本和加拿大总体稳定的成果增长模式,我国是近23年唯一保持论文数量快速增长的高发文量国家,该趋势在2011年之后尤为明显。就成果质量而言,美国(50篇)、中国(48篇)、德国(37篇)、日本(16篇)和加拿大(12篇)JCR一区论文数量同样依次排全球前5位。图2展示了穿透雨时空格局研究全球发文量居前20的国家、与外国合著论文数量,以及论文的篇均引用数量。可知:论文引用率



MCP为与外国作者合著论文数;SCP为单一国家论文数;MCPR为国际合作强度,即多国合著论文数量与本国发文总数的比值。橙色数字表示篇均引用率。

MCP is the Multiple Country Publications; SCP is the Single Country Publications; MCPR is Multiple Country Publication Ratio, representing the ratio between MCP and the total amount of publications in one country. Orange number is average citation per paper.

图2 2000—2022年穿透雨时空格局研究主要发文国家及其国际合作

Fig. 2 Key countries in publications and their collaborations on throughfall spatiotemporal characteristics from 2000 to 2022

同样存在较大的国家间差异。尽管荷兰(16篇)、比利时(13篇)和法国(16篇)无论文数量优势,但篇均引用次数分别高达71.6次、69.5次和52.2次,位居全球前3,说明同行对其研究内容的高关注度。德国(48.2次)和美国(47.5次)紧随其后排第4和第5位,而中国篇均引用次数仅16.9次,与论文总数和JCR一区论文数量高居第2的现状不相称。

本研究借助多国合著论文数量(MCP)进一步评估国家间科研合作程度,结果显示美国(30篇)、德国(24篇)和中国(23篇)学者与他国学者合作撰文数量依旧位居全球前3位。本研究进一步采用国际合作强度(MCPR),即多国合著论文数量与本国发文总数的比值,量化合作研究广度。本领域文章数量前20位的国家中,伊朗国际合作强度最高(0.9),其次为荷兰(0.6)和巴西(0.5),澳大利亚(0.4)和意大利(0.4)并列第4位。由此可见,2000—2022年穿透雨时空格局研究成果主要集中在美国、中国和德国,以上3国国际合作程度高,与他国合作撰文数量位居全球前3位。然而,就国际合作强度来看,伊朗、荷兰和巴西则高居全球前3位。

2.3 主要发文机构及机构间合作

图3展示了穿透雨时空格局研究2000—2022年全球主要发文机构。可知:近23年全球共有254家机构发表穿透雨时空格局领域的研究论文,主要分布在美国(60家)、中国(24家)、德国(22家)、英国(18家)、加拿大(16家),以上5国发文机构数量占全球发文机构总数的55.1%。其中,发文量前10位的机构依次为中国科学院(35篇,占比6.8%)、美国特拉华大学(15篇,2.9%)、日本林业和森林产品研究所(15篇,2.9%)、中国科学院大学(13篇,2.5%)、日本筑波大学(11篇,2.1%)、德国波茨坦大学(11篇,2.1%)、德国拜罗伊特大学(10篇,1.9%)、德国哥廷根大学(10篇,1.9%)、伊朗德黑兰大学(9篇,1.7%)和美国俄勒冈州立大学(9篇,1.7%)。以上机构仅占发文机构数量的3.9%,却发表了近23年该领域26.7%的论文。

图4展示了穿透雨时空格局研究2000—2022年全球主要发文机构之间合作。可知:机构合作图谱分析结果显示,中国科学院是全球穿透雨时空格局研究的核心机构之一,与包括中国林业科学院、德

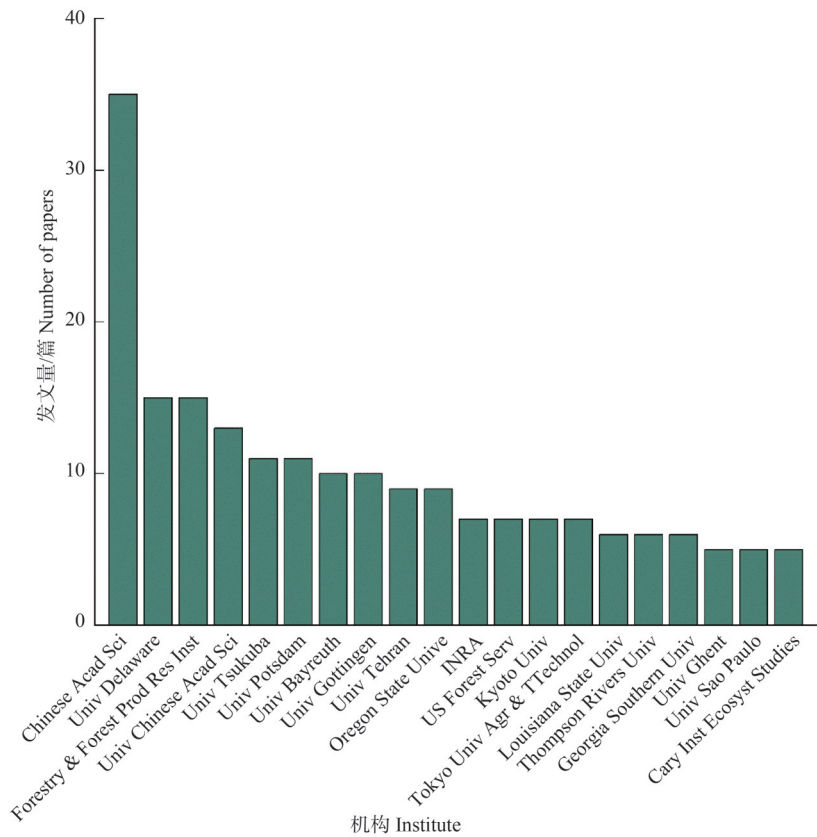
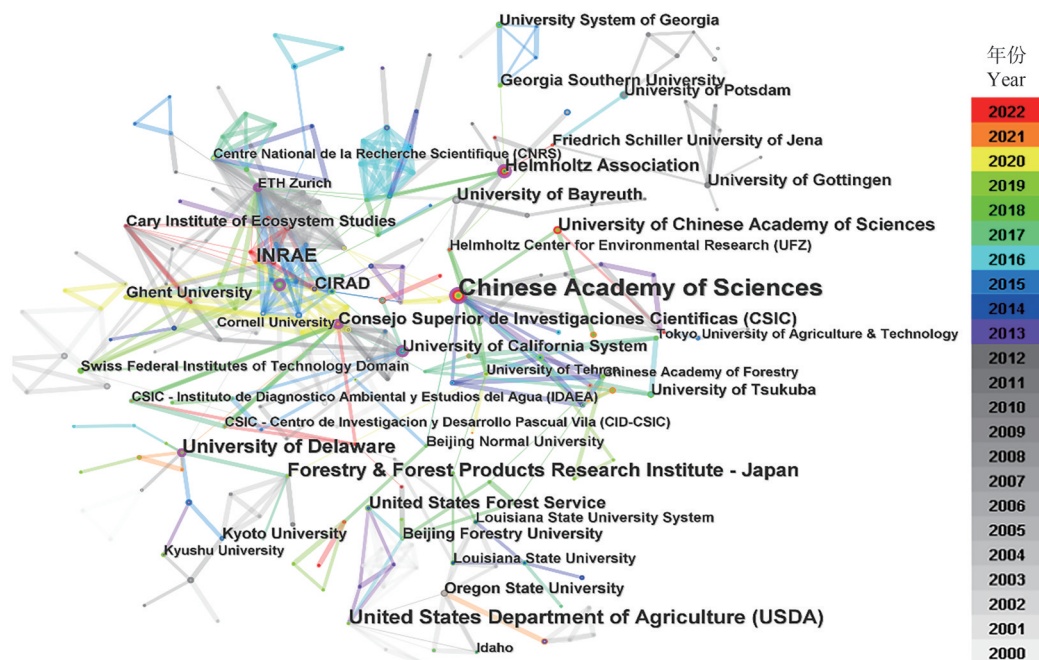


图3 2000—2022年穿透雨时空格局研究主要发文机构

Fig. 3 Key institutes in publications on throughfall spatiotemporal characteristics study from 2000 to 2022



连线代表存在合作, 连线颜色表示合作发文年份。

The lines represent the collaborations between institutes, and the colors of lines mean the year of their collaborated publications.

图 4 2000—2022 年穿透雨时空格局研究机构合作共现图

Fig. 4 Throughfall spatiotemporal characteristics study institutes collaborate on co-occurrence map from 2000 to 2022

国亥姆霍兹环境研究中心、日本筑波大学等国内外机构合作紧密。国外主要研究机构之间亦具有紧密的合作关系, 其中重要的合作研究网络包括美国特拉华大学、日本林业和森林产品研究所、京都大学和九州大学, 法国农业科学研究院、法国农业国际合作研究发展中心、瑞士苏黎世联邦理工学院和比利时根特大学, 德国亥姆霍兹联合会、拜罗伊特大学、哥廷根大学、耶拿大学和波茨坦大学, 美国农业部、美国林务局、俄勒冈州立大学和路易斯安那州立大学。综上, 穿透雨时空格局领域的重要研究机构主要集中在美国、中国、德国和日本, 各机构间合作紧密, 形成了各具特色的区域性合作研究网络。

2.4 主要发文作者及作者间合作

2000—2022 年全球共有 1 775 名学者发表穿透雨时空格局为主题的研究论文。图 5 展示了穿透雨时空格局研究 2000—2022 年全球主要发文学者间的合作关系。可知: Levia DF (19 篇)、Nanko K (15 篇)、van Stan JT (14 篇)、Onda Y (14 篇)、Keim RF (11 篇)、Elsenbeer H (10 篇) 和 Kato H (10 篇) 发文超过 10 篇。其中, 美国特拉华大学 Levia DF 是近

23 年唯一保持成果持续产出的学者。按 2018—2022 年发文量统计, 美国克利夫兰州立大学 van Stan JT (7 篇)、日本林业和森林产品研究所 Nanko K (5 篇) 和天津大学孙新超 (4 篇) 是该领域研究近期相对活跃的学者。部分学者近 23 年保持了相对明确的合作关系, 比如 Levia DF、van Stan JT 和 Nanko K, Onda Y、Kato H 和 Gomi T, Elsenbeer H、Germer S、Zimmermann A 和 Zimmermann B, 王新平和张亚峰, Shinohara Y、Otsuki K 和 Jeong S, 刘文杰、杨斌和蒋小金, Bytnerowicz A、Fenn ME 和 Jovan S, 吴建平和苏泳娴, 以及 Staelens J、Verheyen K、Verhoest NEC 和 De schrijver A 等。

3 研究热点与趋势分析

3.1 研究热点

关键词是对研究成果主旨的高度概括和精准提炼, 通过对多项研究成果高频关键词的综合分析, 可归纳相关领域的研究热点, 揭示其变化规律^[63]。绘制关键词知识图谱(包括关键词共现图谱、聚类图谱和突现图谱)为直观展示当前研究热点, 以及在未来研究中亟需攻关的主要方向提供了

和污染物(如 Methylmercury)运移是穿透雨时空特征研究的应用和拓展;3)冠层降水再分配驱动化学循环的影响机制(如冠层持水能力、盖度等)是理解森林生态水文过程的基础。

3.2 前沿趋势

关键词突现图谱提供了相关研究领域关键词的发展路径和发表时间信息,可分析得到特定时间段内的研究前沿^[69]。据此,本研究对 2000—2022 年

内特定时间段引用频率相较于其余时段显著升高的关键词进行了统计,得到突现关键词、突现强度、突现起始和终止时间,以及突现趋势,以分析穿透雨空间异质性及其时间稳定性研究前沿随时间的发展趋势。如表 1 所示,参考关键词突现强度可将近 23 年划分为 2000—2009 年、2009—2013 年,和 2014—2022 年 3 个阶段。其中,2000—2009 年研究阶段的突现关键词“土壤”和“化学”,较之同时期其

表 1 2000—2022 年穿透雨时空格局领域排名前 25 的突现词

Table 1 Top 25 prominent words in the field of throughfall spatiotemporal characteristics

关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year	2020—2022 年
chemistry	2000	4.85	2000	2009	
ecosystem	2001	3.10	2001	2005	
soil	2002	7.61	2002	2008	
plot scale	2002	3.43	2002	2006	
spatial pattern	2005	3.10	2005	2006	
soil water dynamics	2009	3.75	2009	2012	
overland flow	2009	3.65	2009	2010	
water	2001	4.14	2010	2011	
cloud forest	2010	3.01	2010	2011	
dry deposition	2000	4.64	2011	2014	
forest canopy	2006	3.49	2012	2013	
temporal stability	2014	3.44	2014	2017	
soil water	2015	4.31	2015	2020	
spatial distribution	2005	3.83	2015	2019	
emission	2015	3.38	2015	2016	
canopy interception	2006	3.55	2016	2018	
evaporation	2006	3.08	2017	2018	
forest hydrology	2006	3.76	2018	2022	
heterogeneity	2018	3.51	2018	2022	
exotic pine plantation	2019	3.35	2019	2020	

注:强度表示关键词出现的频次。红色线段表示从关键词突现开始至突然结束的时间,长度越长,说明关键词热度持续时间越久,研究前沿性越强。

Note: Intensity indicates the frequency of keyword appearance. The red line segment indicates the time from the beginning of keyword emergence to the end of the emergence, the longer the length, the longer the duration of keyword hotness, the stronger the research frontier.

余关键词不仅突现强度明显更强(分别为 7.6 和 4.9),突现时长也同样明显更长(分别为 2002—2008 年和 2000—2009 年),表明该阶段主要基于样地尺度的相关研究,侧重探讨穿透雨空间格局对土壤化学过程的影响,由降水再分配驱动的水养分耦合可能是该阶段的热点方向。2009—2013 年穿透雨时空格局研究中突现关键词“干沉降”和“水”突现强度最高(分别为 4.6 和 4.1),并且新增了突现关键词“地表径流”和“森林冠层”,表明该阶段研究不仅延续了对土壤生态水文过程的关注,也逐渐强调对地表水文过程,以及基于干沉降的冠层拦截效应的分析,突出了对由冠层、地表和土壤所构成的完整水文路径,和随之运移的养分循环的重视。云雾森林(Cloud Forest)是该阶段穿透雨时空格局研究的代表性生态系统类型。以上 2 个阶段研究多关注降水再分配所驱动的养分运移及其在土壤中的富集过程,但也均表现出对穿透雨空间格局的时间稳定性分析存在不足。自 2014 年起,相关领域研究由重视水养分耦合转变到尤为关注水文过程,其中“土壤水分(4.3)”、“空间分布格局(3.8)”、“森林水文(3.8)”是突现强度最高的关键词。新增的突现关键词表明,该阶段研究通过结合冠层截留、土壤蒸发和土壤水分动态的综合分析,延续了上一阶段研究重视“冠层-地表-土壤”完整水文过程分析的特点,同时尤其增加了对穿透雨特定空间格局时间稳定性的关注,弥补了上 2 个阶段研究所存在的不足。松树人工林是该时期研究的代表性植被类型。最后,通过梳理并对比 2000—2022 年不同阶段的研究前沿趋势,可发现量化穿透雨空间格局及其对土壤水文过程的影响是开展穿透雨时空特征研究的经典方向,伴随研究的逐步深入,可以结合与水文过程深度耦合的养分循环,以及贯穿“大气-植被-土壤连续体”的完整水文过程研究,扩展当前研究前沿的深度和广度,以期更加深刻和全面的认识由植被冠层降水再分配驱动的森林水养分循环机制及其重要意义。

4 结论与展望

本研究基于 Web of Science 核心合集数据库,采用 CiteSpace 和 R 软件 Bibliometrix 包,对 2020—2022 年穿透雨空间异质性及其时间稳定性研究领域经过同行评议的学术论文进行文献计量分析,主

要结论如下:

1)研究成果及其趋势方面。2000—2022 年全球共发表相关主题的学术论文 517 篇,JCR 一区论文 255 篇,高度集中在美、中、德等少数国家,中国科学院等重要机构,Levia DF 等关键学者,和 *Journal of Hydrology* 等旗舰期刊。近 23 年该领域论文总量和 JCR 一区论文年均增长率分别为 5.0% 和 6.8%,2000—2019 年增长尤为明显,二者年均增长高达 7.6% 和 10.4%,但 2020 年却较之 2019 年分别锐减 56.8% 和 73.1%,推测可能与新型冠状病毒肺炎疫情对野外观测的严重干扰有关。我国是 2000—2023 年唯一保持论文数量快速增长的高发文量国家,但篇均引用次数(16.9 次)远低于荷兰(71.6 次)、比利时(69.5 次)、法国(52.2 次)、德国(48.2 次)和美国(47.5 次)。因此,建议在未来研究中深化与国内外优秀机构和学者合作,重视当前研究基础相对薄弱的干旱半干旱生态系统,做好野外观测应急预案,为我国科技影响力的持续提升提供有效支撑。

2)研究热点及其趋势方面。2000—2022 年全球穿透雨空间异质性及其时间稳定性研究大致可分为 3 个阶段。其中:第 1 阶段为 2000—2009 年,研究主要集中于样地尺度,侧重探讨穿透雨空间格局对土壤化学过程的影响,对时间稳定性研究关注不足;第 2 阶段为 2009—2013 年,研究逐渐强调对地表水文和冠层沉积物运移过程的分析,突出了基于“冠层-地表-土壤”水文路径对穿透雨生态水文意义的系统认识;第 3 阶段为 2014—2022 年,研究尤为关注水文过程,结合冠层截留、土壤蒸发和土壤水分动态的综合分析,延续了基于完整水文过程的系统分析特点,增加了对穿透雨特定空间格局时间稳定性的精准刻画。因此,未来研究需要建立在对降水再分配数量特征的整体把握之上,理解地球关键带水文过程是认识穿透雨在“大气-植被-土壤连续体”中重要生态意义的关键,而阐明与之深度耦合的养分和污染物运移过程则是穿透雨时空特征研究的重要应用和拓展,在此基础上系统分析冠层降水再分配所驱动的化学循环及其影响机制,以期更加深刻和全面的认识森林生态水文过程和格局。

参考文献 References

- [1] 翟波,党晓宏,陈曦,刘湘杰,杨世荣.内蒙古典型草原区光伏电板降水再分配与土壤水分蒸散分异规律[J].中国农业大学学报,2020,25(9):

- 144-155
- Zhai B, Dang X H, Chen X, Liu X J, Yang S R. Difference regularity of precipitation redistribution and soil water evapotranspiration in photovoltaic panels in typical steppe areas of Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(9):144-155 (in Chinese)
- [2] Durocher M G. Monitoring spatial variability of forest interception [J]. *Hydrological Processes*, 1990, 4(3):215-229
- [3] Levia D F, Hudson S A, Llorens P, Nanko K. Throughfall drop size distributions: A review and prospectus for future research [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 2017, 4(4):e1225
- [4] Zhang Y F, Yuan C, Chen N, Levia D F. Rainfall partitioning by vegetation in China: A quantitative synthesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617:128946
- [5] Yuan C, Gao G Y, Fu B J. Comparisons of stemflow and its bio-/abiotic influential factors between two xerophytic shrub species [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3):1421-1438
- [6] 袁川. 半干旱区典型灌木降水再分配模式与影响机制研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2017
- Yuan C. Rainfall redistribution and its influential mechanism of two dominant shrub species in semi-arid region, China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017 (in Chinese)
- [7] Fathizadeh O, Sadeghi S M M, Holder C D, Su L. Leaf phenology drives spatio-temporal patterns of throughfall under a single *Quercus castaneifolia* C A Mey[J]. *Forests*, 2020, 11(6):688
- [8] 魏晓华, 周晓峰. 三种阔叶次生林的茎流研究[J]. *生态学报*, 1989, 9(4):325-329
- Wei X H, Zhou X F. A study on the stemflow of three types of natural secondary forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(4):325-329 (in Chinese)
- [9] 魏晓华, 周晓峰. 蒙古栎林生态系统的水分循环与养分循环关系[J]. *农村生态环境*, 1993, 9(1):1-5, 62
- Wei X H, Zhou X F. Study on relation between water cycling and nutrient cycling in oak forest ecosystem [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1993, 9(1):1-5, 62 (in Chinese)
- [10] 莫江明, 方运霆, 张德强, 孔国辉, 冯肇年. 鼎湖山马尾松林降水再分配对养分动态影响[J]. *广西植物*, 2002, 22(6):529-533, 536
- Mo J M, Fang Y T, Zhang D Q, Kong G H, Feng Z N. Effects of rainfall reallocation on nutrient dynamic of a pine forest in Dinghushan [J]. *Guihaia*, 2002, 22(6):529-533, 536 (in Chinese)
- [11] Guo L, Mount G J, Hudson S, Lin H, Levia D F. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots [J]. *Geoderma*, 2020, 357:113953
- [12] Wang Y, Liu S R, Luan J W, Chen C, Cai C J, Zhou F, Di Y P, Gao X M. Nitrogen addition exacerbates the negative effect of throughfall reduction on soil respiration in a bamboo forest [J]. *Forests*, 2021, 12(6):724
- [13] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, Pan Y X. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539:406-416
- [14] Sun X C, Onda Y, Hirata A, Kato H, Gomi T, Liu X Y. Effect of canopy openness and meteorological factors on spatial variability of throughfall isotopic composition in a Japanese cypress plantation [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(8):1038-1049
- [15] Guswa A J, Spence C M. Effect of throughfall variability on recharge: Application to hemlock and deciduous forests in western Massachusetts [J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(5):563-574
- [16] Zhang S Y, Li X Y, Li L, Huang Y M, Zhao G Q, Chen H Y. The measurement and modelling of stemflow in an alpine *Myricaria squamosa* community [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(6):889-899
- [17] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, Verhoest N E C. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: Influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(1):33-45
- [18] Carlyle-Moses D E, Lishman C E. Temporal persistence of throughfall heterogeneity below and between the canopies of juvenile lodgepole pine (*Pinus contorta*) [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(18):4051-4067
- [19] 李海防, 俞洁蕾, 邵西宁, 周春玲. 半湿润地区城市绿地灌木的截留集水功能及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5):1363-1369
- Li H F, Yu J L, Shao X N, Zhou C L. Canopy interception and water harvesting function of shrubs in urban green spaces of semi-humid region and their influencing factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5):1363-1369 (in Chinese)
- [20] Sheng H C, Cai T J. Spatial variability of throughfall in a larch (*Larix gmelinii*) forest in great kingan mountain, northeastern China [J]. *Forests*, 2021, 12(4):393
- [21] Wullaert H, Pohlert T, Boy J, Valarezo C, Wilcke W. Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: Extent, temporal stability and drivers [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1-2):71-79
- [22] Zhu X, He Z B, Du J, Chen L F, Lin P F, Tian Q Y. Spatial heterogeneity of throughfall and its contributions to the variability in near-surface soil water-content in semiarid mountains of China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 488:119008
- [23] 张亚峰, 王新平, 虎瑞, 潘颜霞. 荒漠灌丛降雨再分配对土壤 pH 值的影响 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5):1400-1405
- Zhang Y F, Wang X P, Hu R, Pan Y X. Effects of rainfall redistribution induced by xerophytic vegetation on soil pH [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5):1400-1405 (in Chinese)
- [24] 吴应明, 韩璐, 刘柯言, 胡旭, 付照琦, 陈立欣. 晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3):588-596
- Wu Y M, Han L, Liu K Y, Hu X, Fu Z Q, Chen L X. Water source of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations under different soil moisture conditions in the Loess Plateau of Western Shanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3):588-596 (in Chinese)
- [25] 李中恺, 李小雁, 周沙, 杨晓帆, 付永硕, 缪驰远, 王帅, 张光辉, 吴秀臣, 杨超, 邓元红. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展 [J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(11):2105-2138
- Li Z K, Li X Y, Zhou S, Yang X F, Fu Y S, Miu C Y, Wang S, Zhang G H, Wu X C, Yang C, Deng Y H. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(11):2105-2138 (in Chinese)
- [26] Van Stan J T, Pypker T G. A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536:813-824
- [27] Hanson P J, Todd D E, Amthor J S. A six-year study of sapling and large-tree growth and mortality responses to natural and induced variability in precipitation and throughfall [J]. *Tree Physiology*, 2001, 21(6):345-358
- [28] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(1):16-22

- Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(1): 16-22 (in Chinese)
- [29] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143
- Xu X L, Ma K M, Fu B J, Liu X C, Huang Y, Qi J. Research review of the relationship between vegetation and soil loss [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3137-3143 (in Chinese)
- [30] 邢瑜, 侯泽海, 宗世祥. 基于 CiteSpace 的昆虫性别决定基因研究现状与热点分析[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(2): 110-121
- Xing Y, Hou Z H, Zong S X. Current status and hot spots of insect sex determining gene researches based on CiteSpace analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 110-121 (in Chinese)
- [31] Garfield E, Paris S W, Stock W G. HistCited™: A software tool for informetric analysis of citation linkage [J]. *Information Wissenschaft und Praxis*, 2006, 57(8): 391-400
- [32] Büyükkidik S. A bibliometric analysis: A tutorial for the bibliometrix package in R using IRT literature [J]. *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, 2022, 13(3): 164-193
- [33] Agrawal A. Using RefViz with EndNote [M]. In: *EndNote 1-2-3 Easy!*. Boston: Springer, 2009, 263-275
- [34] 刘启元, 叶鹰. 文献题录信息挖掘技术方法及其软件 SATI 的实现: 以中外图书情报学为例[J]. *信息资源管理学报*, 2012, 2(1): 50-58
- Liu Q Y, Ye Y. A study on mining bibliographic records by designed software SATI: Case study on library and information science [J]. *Journal of Information Resources Management*, 2012, 2(1): 50-58 (in Chinese)
- [35] 刘雅莉, 吴侯, 顾盼, 杜剑卿, 王艳芬. 生物多样性-生产力关系研究进展: 基于文献计量分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(18): 7782-7795
- Liu Y L, Wu Y, Gu P, Du J Q, Wang Y F. Progress and future direction of biodiversity-productivity relationship research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7782-7795 (in Chinese)
- [36] 陈甜倩, 高阳, 冯喆, 杨杨, 吴克宁, 赵华甫. 基于 CiteSpace 的土壤生态系统服务研究热点与趋势[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(7): 204-219
- Chen T Q, Gao Y, Feng Z, Yang Y, Wu K N, Zhao H F. Hotspots and trends of soil ecosystem services based on CiteSpace [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 204-219 (in Chinese)
- [37] Jiang Y W, Ritchie B W, Benckendorff P. Bibliometric visualisation: An application in tourism crisis and disaster management research [J]. *Current Issues in Tourism*, 2019, 22(16): 1925-1957
- [38] Hou J H, Yang X C, Chen C M. Emerging trends and new developments in information science: A document co-citation analysis (2009—2016) [J]. *Scientometrics*, 2018, 115(2): 869-892
- [39] 陈超美, 陈悦, 侯剑华, 梁永霞. CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. *情报学报*, 2009, 28(3): 401-421
- Chen C M, Chen Y, Hou J H, Liang Y X. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2009, 28(3): 401-421 (in Chinese)
- [40] Fan J L, Oestergaard K T, Guyot A, Jensen D G, Lockington D A. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(5): 793-804
- [41] Keim R F, Link T E. Linked spatial variability of throughfall amount and intensity during rainfall in a coniferous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 15-21
- [42] Levia D, Frost E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems [J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2006, 30(5): 605-632
- [43] Nanko K, Onda Y, Ito A, Moriwaki H. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1173-1182
- [44] Shinohara Y, Onozawa Y, Chiwa M, Kume T, Komatsu H, Otsuki K. Spatial variations in throughfall in a Moso bamboo forest: Sampling design for the estimates of stand-scale throughfall [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(3): 253-259
- [45] Siegert C M, Drotar N A, Alexander H D. Spatial and temporal variability of throughfall among oak and co-occurring non-oak tree species in an upland hardwood forest [J]. *Geosciences*, 2019, 9(10): 405
- [46] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, Pan Y X. Meteorological influences on process-based spatial-temporal pattern of throughfall of a xerophytic shrub in arid lands of Northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 1003-1013
- [47] Zimmermann A, Germer S, Neill C, Krusche A V, Elsenbeer H. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1-4): 87-102
- [48] Dohnal M, Černý T, Votrubová J, Tesář M. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2014, 62(4): 277-284
- [49] Hsueh Y H, Allen S T, Keim R F. Fine-scale spatial variability of throughfall amount and isotopic composition under a hardwood forest canopy [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(11): 1796-1803
- [50] Dezhban A, Attarod P, Amiri G Z, Pypker T G, Nanko K. Spatial and temporal variability of throughfall under a natural *Fagus orientalis* stand in the Hyrcanian forests, north of Iran [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(7): 1843-1858
- [51] Fathizadeh O, Sadeghi S M M, Pazhouhan I, Ghanbari S, Attarod P, Su L. Spatial variability and optimal number of rain gauges for sampling throughfall under single oak trees during the leafless period [J]. *Forests*, 2021, 12(5): 585
- [52] Van Stan J T, Hildebrandt A, Friesen J, Metzger J C, Yankine S A. *Spatial variability and temporal stability of local net precipitation patterns* [M]. In: Van Stan J T, Gutmann E, Friesen J, eds. *Precipitation Partitioning by Vegetation*. Cham: Springer, 2020: 89-104
- [53] Fathizadeh O, Attarod P, Keim R F, Stein A, Amiri G Z, Darvishsefat A A. Spatial heterogeneity and temporal stability of throughfall under individual *Quercus brantii* trees [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 1124-1136
- [54] 刘泽彬, 王彦辉, 邓秀秀, 刘宇, 张桐, 左海军, 王亚蕊, 熊伟, 于澎湃, 徐丽宏. 六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3471-3481
- Liu Z B, Wang Y H, Deng X X, Liu Y, Zhang T, Zuo H J, Wang Y R, Xiong W, Yu P T, Xu L H. Spatial variations of throughfall in a *Larix principis-ruprechtii* plantation of Liupan Mountains, Ningxia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3471-3481 (in Chinese)
- [55] 谭俊磊, 马明国, 车涛, 白云洁. 基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 825-833
- Tan J L, Ma M G, Che T, Bai Y J. A study of interception of *Picea crassifolia* based on different canopy closure [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 825-833 (in Chinese)
- [56] 赵赫, 文志, 刘艳秋, 郑华. 典型热带森林生态系统林冠穿透雨特征及影响

- 因素[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 74-80
- Zhao H, Wen Z, Liu Y Q, Zheng H. Characteristics and influencing factors of canopy throughfall in typical tropical forest ecosystems [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(4): 74-80 (in Chinese)
- [57] 袁川, 岳晓萍, 张亚峰, 张瑜, 胡彦婷, 唐强, 郭立, 王帅, 段兴武, 项文化, 魏晓华, 李小雁. 冠层降水再分配驱动生态系统养分富集: 机制、数量与模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(5): 1556-1572 (in Chinese)
- Yuan C, Yue X P, Zhang Y F, Zhang Y, Hu Y T, Tang Q, Guo L, Wang S, Duan X W, Xiang W H, Wei X H, Li X Y. Nutrient enrichment driven by canopy rainfall redistribution: Mechanism, quantification, and pattern [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(5): 1529-1544 (in Chinese)
- [58] 席承藩, 张俊民, 丘宝剑, 刘东来. 中国自然区划概要[M]. 北京: 科学出版社, 1984
- Xi C F, Zhang J M, Qiu B J, Liu D L. *Outlines of China's Natural Divisions* [M]. Beijing: Science Press. 1984 (in Chinese)
- [59] Wang Y P, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 437-448
- [60] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 180214
- [61] 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
- [62] Aria M, Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis [J]. *Journal of Informetrics*, 2017, 11(4): 959-975
- [63] 孟静, 唐研, 徐淑良, 孔庆富, 孙家波, 王磊. 基于文献计量的国内外小麦遗传育种研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 64-72
- Meng J, Tang Y, Xu S L, Kong Q F, Sun J B, Wang L. Research progress on Chinese and foreign wheat genetic breeding based on bibliometrics [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(3): 64-72 (in Chinese)
- [64] 王耕, 周腾禹. 基于文献计量分析的区域生态安全研究热点与趋势[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6950-6957
- Wang G, Zhou T Y. Research hotspots and trends of regional ecological security based on bibliometric analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6950-6957 (in Chinese)
- [65] Molina A J, Llorens P, Garcia-Estrigana P, Moreno de Las Heras M, Cayuela C, Gallart F, Latron J. Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1421-1432
- [66] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 土层浅薄地区植物水分来源研究方法[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2427-2433
- Nie Y P, Chen H S, Wang K L. Methods for determining plant water source in thin soil region: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2427-2433 (in Chinese)
- [67] Lu J, Zhang S X, Fang J P, Yan H A, Li J R. Nutrient fluxes in rainfall, throughfall, and stemflow in *Pinus densata* natural forest of Tibetan Plateau [J]. *Clean Soil Air Water*, 2017, 45(7): 1600008
- [68] 覃诚, 方向明, 陈典. 中国农村产业融合发展研究现状与展望: 基于CiteSpace文献计量分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 198-208
- Qin C, Fang X M, Chen D. Research status and prospects of rural industrial integration in China: An bibliometric analysis based on CiteSpace [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 198-208 (in Chinese)
- [69] 肖晶, 饶良懿. 基于文献计量分析作物水肥一体化研究特征、热点和趋势[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 144-159
- Xiao J, Rao L Y. Research characteristics, hotspots and trend of crop fertigation based on bibliometric analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 144-159 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 王倩, 浙江农林大学林业与生物技术学院林业生态工程专业硕士研究生。2021年本科毕业于商学院生物与技术学院, 曾获二等奖学金以及互联网十二等奖。攻读硕士期间获得二等奖学金1次、三等奖学金2次。2021和2022年雨季在中国科学院生态环境研究中心羊圈沟野外观测站驻站工作, 具有良好的野外工作经验。



通讯作者简介: 袁川, 博士, 西南大学地理科学学院副教授。主要从事干旱胁迫影响下典型生态系统的生态水文过程及其植被生理生态响应研究。主持国家自然科学基金青年科学基金项目、中国博士后科学基金项目、国家重点实验室开放基金项目等5项。在 *SCIENCE CHINA Earth Sciences*、*Water Resources Research*、*Hydrology and Earth System Sciences*、*Journal of Hydrology*、*Ecological Indicators*、《中国科学: 地球科学》、《生态学报》等国内外主流期刊发表论文20篇, 参与《中国气候与生态环境演变: 2021》区域专章撰写, 担任 *Agricultural and Forest Meteorology*、*Ecohydrology*、*European Journal of Forest Research*、*Journal of Arid Land*、*Frontiers in Forests and Global Change* 等期刊审稿专家。