

基于文献计量的水文连通性研究热点与趋势

于洋^{1,2}, 刘尧³, 华廷⁴, 查同刚^{1,2}, 许晓明⁵, 张晓霞⁶, 张恒硕^{1,2}, 左启林^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083;
3. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨陵 712100; 4. 北京师范大学 地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展
研究院, 北京 100875; 5. 北京林业大学 园林学院, 北京 100083; 6. 中建一局集团第三建筑有限公司, 北京 100161)

摘要: 水是限制和维系生物活动的主要因子, 水文连通性与诸多生态过程联系紧密。作为表征水循环过程中物质、能量和生物体在景观单元之间传输的过程, 水文连通性建立了地表水循环过程中景观单元物质与能量流之间的相互联系。运用文献计量方法, 以 Web of Science 数据库及 CNKI 数据库为数据源, 检索国内外水文连通性相关研究文献, 运用 Bibexcel、Ucient 和 Citespace 等软件分别得到高频词、关键词共现网络可视图, 在此基础上梳理国内外水文连通性研究进展。研究结果表明: 围绕水文连通性, 国内外发文量均呈现上升趋势, 自 1990 年以来, 国外水文连通度方面的研究与国内相比起步较早, 且增长幅度较大; 从关键词频上看, 国外多偏重于不同类型生态系统结构功能变化对水文连通性的研究, 国内则多偏重于河湖生态系统水系连通演变的研究; 爆发词词频分析显示水文连通性与气候变化、生物多样性以及生态系统服务一度成为该领域研究热点; 根据共现网络可视图, 梳理国内外研究方向, 水文连通性与生态过程、不同类型生态系统水文连通性对物质传输的影响, 生态系统结构和功能的变化对水文连通性的影响等方面是当前的研究热点。开展不同尺度水文连通性制图, 地下水依赖型生态系统水文连通性表征, 基于地理信息技术与长期野外监测资料开展多尺度水文连通性定量评估和模型模拟是未来水文连通性研究的趋势。

关键词: 水文连通性; 文献计量; 关键词频次; 共现网络

中图分类号: P33; X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0001-09

Research progresses and trends of hydrological connectivity based on bibliometrics

YU Yang^{1,2}, LIU Yao³, HUA Ting⁴, ZHA Tonggang^{1,2}, XU Xiaoming⁵, ZHANG Xiaoxia⁶,
ZHANG Hengshuo^{1,2}, ZUO Qilin^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Land Surface Systems and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 6. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China)

Abstract: Water is the main element that restricts yet maintains most of the biological activities, and hydrological connectivity is closely involved in many ecological processes. Hydrological connectivity can characterize the transport of materials, energy and organisms among landscape units and establish a tie between the materials and energy flow of a certain landscape unit in the process of surface water cycle. Here we adopted bibliometric methods to search hydrological connectivity related researches via Web of Science and CNKI database, combining with Bibexcel, Ucient and Citespace procedures to obtain high-frequency words and keyword co-occurrence network views, based on which we reviewed the research progress of hydrological connectivity at home and abroad. The results showed that the volume of publications related to hydrological connectivity both at home and abroad showed an upward trend. The research on this topic in foreign countries has started since 1990, which is earlier than domestic research and its increment in the number of the publi-

收稿日期: 2020-11-15; 修回日期: 2020-12-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2021ZY51); 国家自然科学基金项目(41501091, 51908037); 西北地区生态环境修复关键技术研究与应用项目(CSCEC-2020-Z-5); 中国科协青年人才托举项目(2017-2019年)

作者简介: 于洋(1985-), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 研究方向为生态水文与流域治理。

通讯作者: 查同刚(1973-), 男, 安徽六安人, 博士, 副教授, 研究方向为水土保持与土壤生态。

cations is also larger. In terms of keyword frequency, the research in foreign countries tended to focus on the effects of different types of ecosystems structure and function changes on the hydrological connectivity, whereas domestic research focused on the evolution of hydrological connectivity of the river and lake ecosystems. The analysis of the frequency of outbreak words showed that the relationship between hydrological connectivity and climate change, biodiversity and ecosystem services had become research hotspots in this field. According to the co-occurrence network view, we found that the current research hotspots are hydrological connectivity and ecological processes, the impact of different types of ecosystem hydrological connectivity on material transport, and the impact of changes in ecosystem structure and function on the hydrological connectivity. Furthermore, multi-scale hydrological connectivity mapping, the characterization of groundwater-dependent ecosystem hydrological connectivity, and multi-scale hydrological connectivity quantitative assessment and model simulation based on geographic information technology and long-term field monitoring are the trends of future hydrological connectivity research directions.

Key words: hydrological connectivity; bibliometrics; keyword frequency; co-occurrence network view

1 研究背景

水是维系和限制生态系统生物活动的主要因素,水文连通性与诸多生态过程联系紧密,作为当前水文学研究的热点,被广泛应用于水文水资源、水土保持、地貌学、景观生态学、河流生态学、水生生物学等多学科领域^[1-12]。作为表征水循环过程中物质、能量和生物体在景观单元之间传输的过程,水文连通性建立了地表水循环过程中景观单元物质流与能量流之间的相互联系。虽然人们已对水文连通性的定义进行过深入探讨,实际上并未对水文连通性建立一个单一的且多学科都认同的定义,但明确了水文连通性的两大类型,即静态/结构连通性和动态/功能连通性,通过这种方式,一种景观内的结构模式能随径流量的变化产生不同的水文响应,并产生不同次降水事件或不同时间段的水文过程^[13]。与此同时,人们都强调了地形控制与流域多生态过程之间的重要性,并认为这是理解水文连通性的关键。影响景观的自然结构或特征可能有所不同,但通常以地形、植被、土壤和地质单元等因素为主导^[14-23]。具体来说,水文连通性主要涵盖3类,一是基于地形单元空间关系的景观连通性,二是关注水流在地表运动过程中的水文连通性,三是侧重于泥沙输移过程的泥沙连通性。在开展长期生态建设背景下,流域生态系统结构和功能的变化显著影响流域水文连通性的改变^[13, 24-29]。因此,在开展流域综合治理、河流生态恢复以及“山水田林湖草”规划方面具有重要的应用价值。较之国外水文连通性开展的广泛研究,国内相关报道较少,那么如何基于水文连通性角度分析不同生态系统生态过程演变,以此提升资源利用效率并保护生态环境,是当前流域综合治理

需要考虑的研究重点。基于文献计量方法,系统梳理国内外水文连通性研究的相关进展,能够明晰该研究领域当前热点,同时为分析水文连通性研究趋势以及梳理未来研究方向提供思路。

2 数据来源与研究方法

以 WEB OF SCIENCE 数据库中的 Web of ScienceTM 核心合集为数据源检索国外文献,检索关键词为“hydrological connectivity”,检索年份截止2020年6月,文献类型精炼为 article,包含相关国际会议的会议论文,并在此基础上排除相关度较低的 Web of Science 类别,共检索到1 952篇文献。以中国知网 CNKI 数据库为数据源,检索主题为“水文连通性”的国内期刊文献,并根据文献篇名和摘要内容进行甄别,将相关度低的文献进行排除,共得到中文文献47篇。将搜索到的国外1 952篇文献导入 Bibexcel,选取出现频率在10以上的关键词,在此基础上将相同或相近的关键词合并后,得到最终的关键词,由于国内文献检索数量较少,故检索结果均以国外文献报道为主。将生成的矩阵分别导入 Ucinet,保存为 .h 格式文件。运用 Citespace 生成高频关键词共现网络可视图,并根据关键词词频进行群集与分析。

3 结果与分析

3.1 发文趋势分析

1992年1月-2020年6月间国内外水文连通性方面的研究逐年发文数量的变化如图1所示。由图1可以看出,围绕水文连通性的研究大体可分为两个阶段,第1阶段为1992-2008年,此阶段关于水文连通性的报道未超过100篇,2007年之前年均发文量不足50篇,尚未体现显著增长趋势,且已发

表的研究中尚未对其标准的定义达成共识。2007年,Bracken等^[1]提出了水文连通性的概念模型,概述了既有研究在水文学与生态学上与连通性这个概念之间的联系,并指出在过往研究中对于“水文连通性”术语的使用方式以及如何实现与现有研究的相互联系。此外,初步地将连通性在水文学和地貌学范畴内归纳为3类:(1)景观连通性,即与某一流域内地貌(例如山坡和河道)的物理耦合相关;(2)水文连通性,即水从景观的某一区域流至另一区域的路径,预计会形成某些流域径流响应,通过水与其他物质的输移影响并改变了景观单元属性及空间分布,形成了景观格局与水文过程之间的非线性关系;(3)泥沙连通性,即泥沙及其附着的污染物通过流域的物理转移。景观连通性属于结构连通性,水文连通性和泥沙连通性属于功能连通性。生态学家一直将连通性的概念视为空间结构种群持续性的关键属性,并据此将水文连通性定义为“水文循环内部或水文要素之间水、物质、能量和生物的传递^[30]。”围绕这个定义,许多生态学研究已聚焦于为什么水文连通性对景观生态完整性至关重要以及减少或增强连通性的变化均具有潜在的环境影响^[31]。第2阶段为2008年至今。在这个阶段,学者们以水文连

通性为切入点,对自然因素和人为活动耦合作用下不同类型生态系统结构与生态过程之间的联系开展研究,年均发文量突破100篇,伴随着生态水文学领域的持续发展,研究表明水文连通性的丧失会导致全球生物多样性下降,而特定方向的连通性(例如沿水流方向、沿梯度或者跨梯度、源和汇之间)能够提供关键信息,用以预测污染物运移、规划保护廊道设计以及了解景观或水景如何响应风或水流等方向性力^[32-35]。围绕景观格局与过程,学者们尝试基于图论方法构建水文连通性指数用以表征景观格局变化对生态过程的影响,并意识到连通性评估对于正确解决水沙相关问题以及提升水文-地貌系统管理策略的重要性^[36-37]。在国内方面,自2003年以来,国内学者围绕水文连通性与河湖关系、水利工程建设对水生态环境的影响、湿地生态系统水文连通性、景观格局变化对土壤侵蚀过程的影响以及景观格局指数的意义与评价等方面相继开展了深入探索,并提出了综合水文连通性的修复模型框架^[38-41],但从中文文献检索结果来看,国内围绕水文连通性的研究仍在起步阶段,对水文连通性与流域综合治理,尤其是长期人类活动背景下生态系统格局与过程的演变对水文连通性的影响等方面的研究尚少。

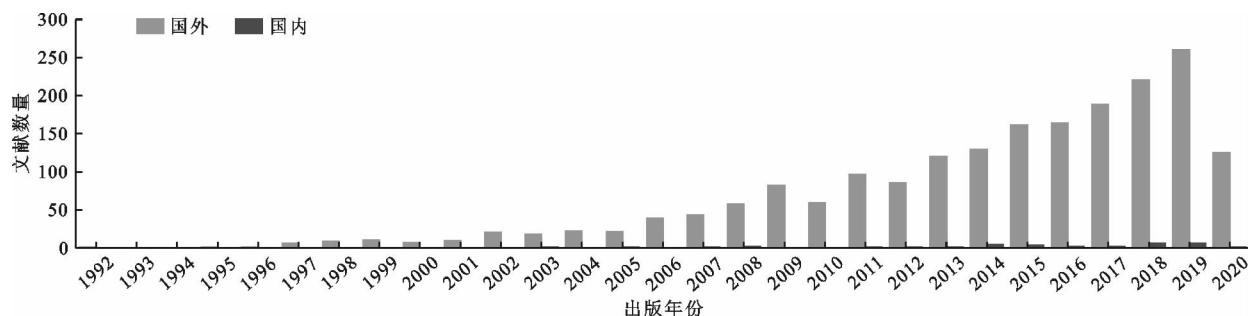


图1 1992-2020年国内外水文连通性研究的文献数量

3.2 关键词词频分析

通过对所有检索文章的关键词进行分析,提炼出频率大于10次的关键词作为高频词,并根据高频词分析水文连通性的相关研究热点,关键词检索情况如图2所示。由图2可知,出现频次较高的关键词为“hydrological connectivity(水文连通性)”,“run-off(径流)”,“climate change(气候变化)”,“pattern(格局)”,“scale(尺度)”,“ecosystem services(生态系统服务)”和“biodiversity(生物多样性)”等。总体上看,关键词中涵盖水文、生态、土壤、地貌等多个学科领域,涉及水资源与水工程、生物地球化学循环、景观生态学、洪水管理、水生态水环境、水力学与河流动力学、水土保持学、流域治理与生态恢复等多

个研究方向,包含气候变化、降水、土地利用、植被、城镇化等自然和人类活动等影响因素以及尺度效应与临界/阈值现象。并且关键词中涉及入渗、产流、水量平衡等多个水文环节以及雷达、地理信息系统、稳定同位素、水文模型等相关研究方法。

国内的文献检索关键词主要包括水文模拟、水系规划、水系连通性、优先恢复节点、河流生态系统等。由此也可以看出,国内外相关研究侧重点略有不同,国外相关报道聚焦于水文连通性与生态系统服务之间的关系和气候变化和人类活动对水文连通性的影响,国内较为关注河湖生态系统方面的研究。

3.3 爆发词词频分析

在关键词词频分析的基础上,对爆发词词频进

行分析,能够看出水文连通性在不同阶段的研究热点。基于前文关键词分析,提取了 20 个爆发词,国外水文连通性研究文献的爆发词与频次如图 3 所示。

示。受限于中文文献数量以及关键词较为分散的影响,无法对国内相关文献的爆发词进行提取,所以爆发词词频主要以国外文献为主。

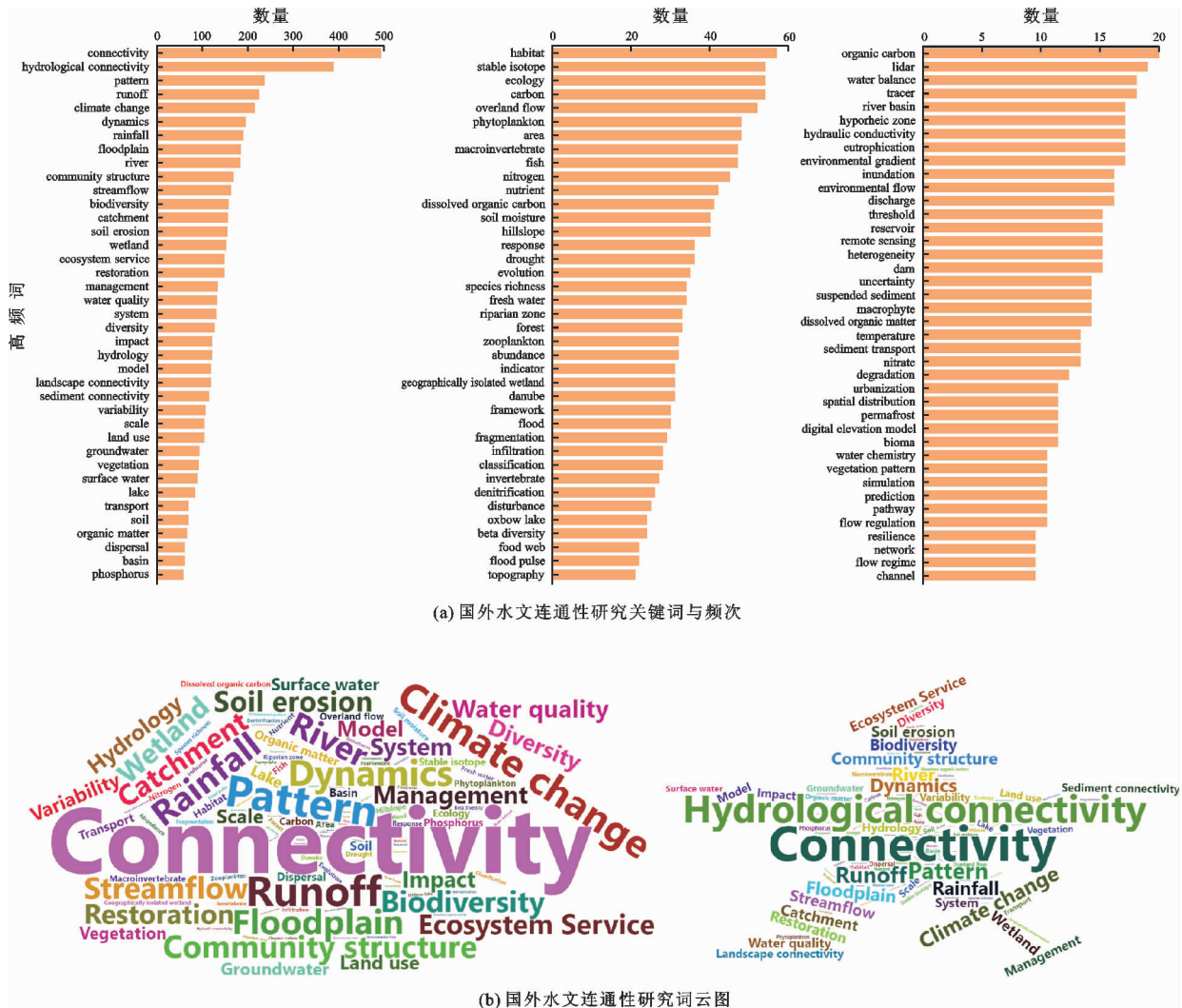


图 2 1992 - 2020 年国外水文连通性研究文献的关键词与频次及词云图

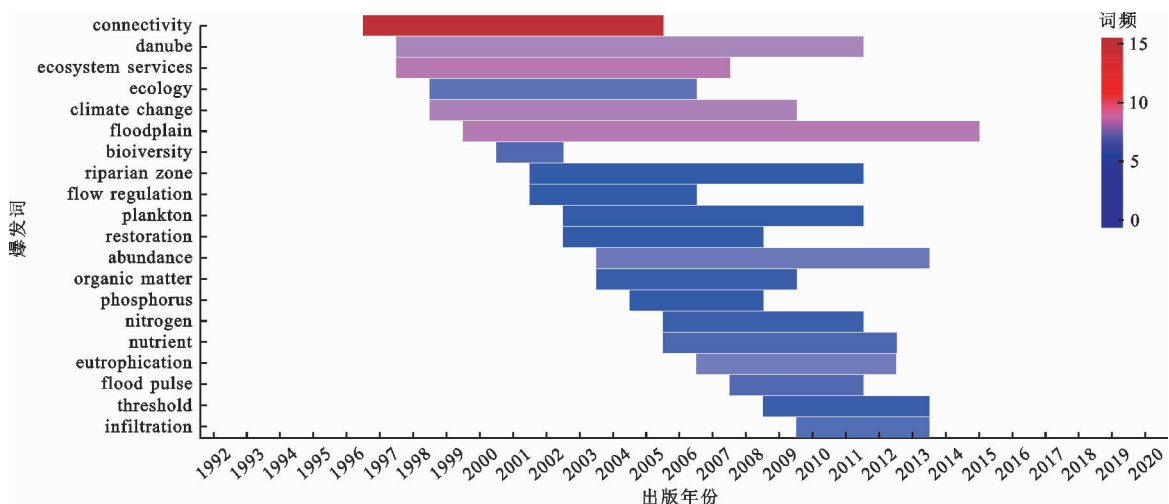


图 3 1992 - 2020 年国外水文连通性研究文献的爆发词与频次

由图 3 可知,除表征研究地点的多瑙河和表征研究领域的生态学外,连通性、生态系统服务、生态学、气候变化、洪泛区、生物多样性、河岸带、流量调节、浮游生物、生态恢复、丰富度、有机质、氮、磷、养分、富营养化、阈值和入渗为 1992 - 2020 年不同时间段内集中出现的爆发词,由此也可以发现,水文连通性在气候变化和人类活动背景下,植被格局对生物多样性、养分传输和水文过程的影响是近十几年的研究热点。值得注意

的是,作为表征水文连通性的景观格局指数并未呈现阶段性的爆发词,这一方面说明了指数自身属性与相关生态过程,例如土壤侵蚀过程的复杂性,同时也意味着构建表征生态过程的相关指数或在现有指数基础上改进,依旧是开展景观格局-生态过程关系研究的重要方向。此外,基于前文的关键词词频分析,根据检索到的文献数量,统计了报道水文连通性的主要期刊和主要国家,结果如图4所示。

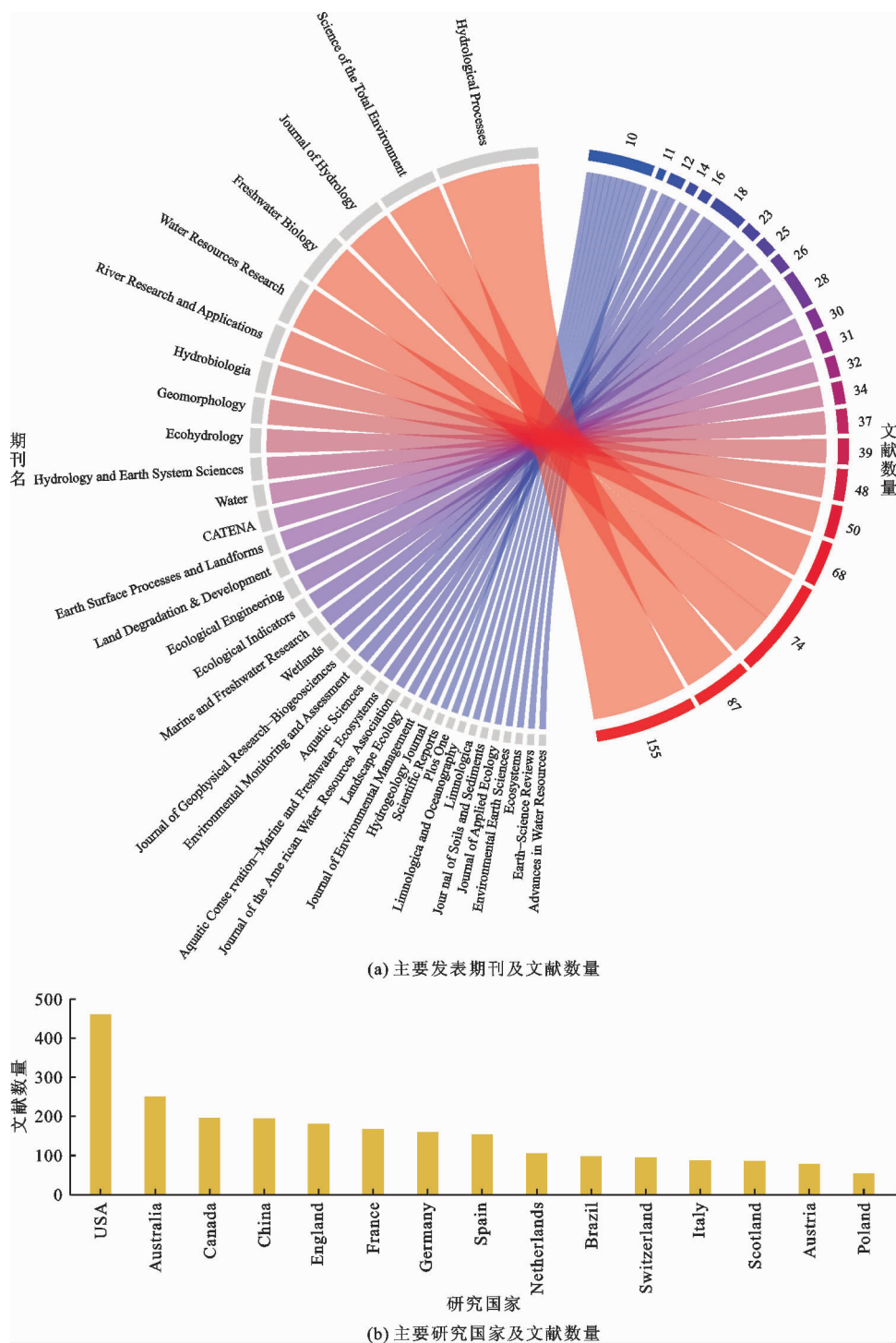
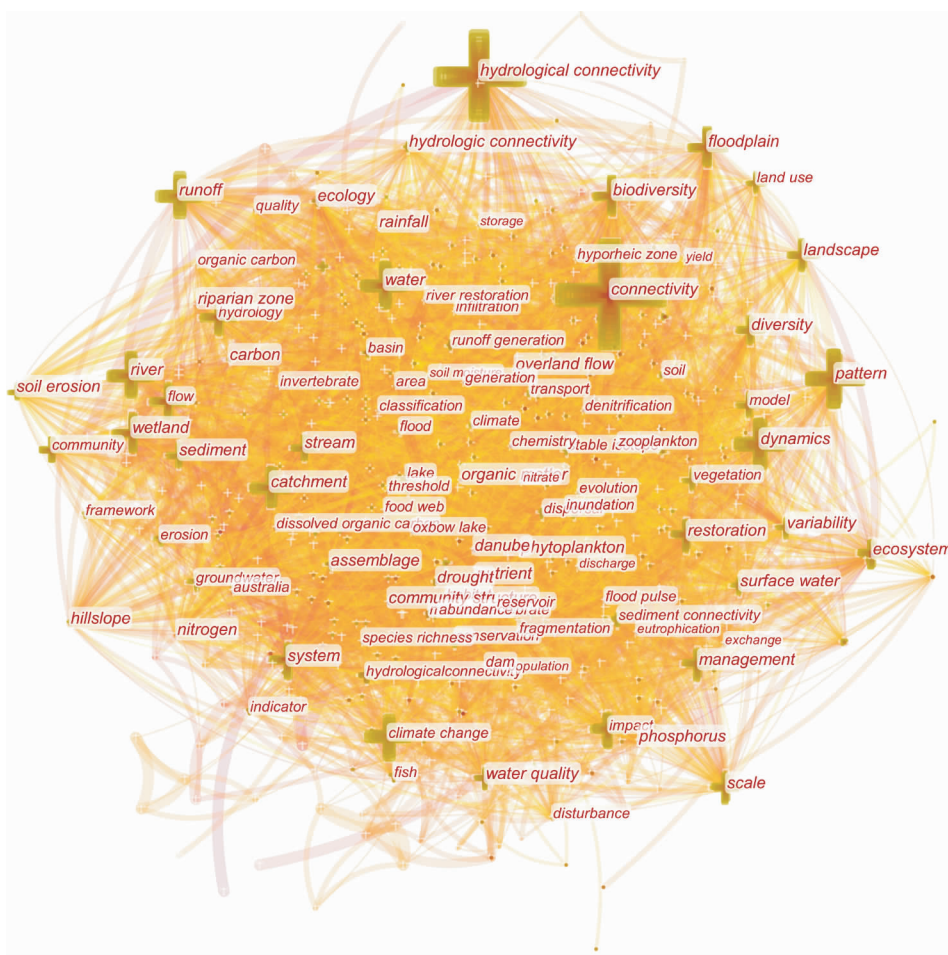


图4 1992-2020年水文连通性研究文献主要发表期刊及国家

数量较少,但来自中国的研究报道在国际期刊的发文量总体位居中游。

共词分析是开展文献计量的常规手段,因每篇文章研究内容并不是用孤立的单一关键词概括,需要结合多个关键词进行共同表达。与此同时,相同领域的关键词大概限定在一个范围内,不同研究文献常具有相似的关键词,所以,根据前文高频关键词的统计结果,对高频关键词进行共词分析,其结果能够体现本领域研究主题与研究热点。

采用 Citespace 制图,进行共词分析结果可视化,建立关键词之间的共现关系。可视图中节点的大小表示该关键词同其他关键词共现频次,节点越大,则频次越高,关键词中心度也越大;两节点之间的连线表示这两个关键词出现在同一篇文献中,连线越粗表示共现次数越多,关系越密切。国外水文连通性文献中相关关键词共现网络如图 5 所示。



由图 5 可知,节点较大的关键词有“hydrological connectivity(水文连通性)”、“runoff(径流)”、“cli-

mate change(气候变化)”、“floodplain(洪泛区)”、“land use(土地利用)”和“scale(尺度)”等,这也在

一定程度上代表了与水文连通性较为密切的研究方向。在小流域综合治理方面,长期植被恢复以及人类活动影响流域生态过程,直接影响流域内景观单元的连通性,如图6所示,坡面-沟道水土保持工程措施的修建,以及大规模植被恢复,均会改变流域内的“源-汇”格局,那么如何识别且高效开展植被恢复以实现流域可持续治理,水文连通性为开展小流域综合治理提供了新的视角。国内方面受限于文献数量与关键词数量较少,共词现象不明显,故对国内以水文连通性为主题的相关报道将在相关文献以及关键词累积到一定数量后再做分析。

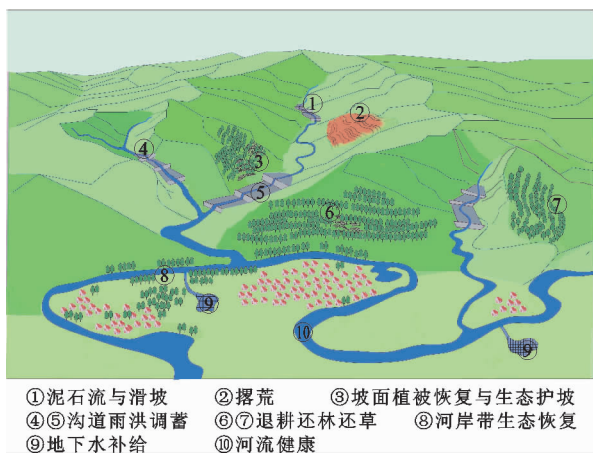


图6 小流域综合治理对流域内景观单元连通性的影响示意图

4 结论与展望

本文运用文献计量方法,对1992-2020年国内外水文连通性方面的研究文献,从发表数量、关键词出现频次、高频关键词统计和关键爆发词强度进行提炼和解析,并对高频关键词进行共现可视化制图,分析了当前水文连通性领域的研究热点和发展趋势,得出如下结论:

(1)国外水文连通性方面的研究起步较早,发文数量稳中有升,2019年全年发文量已超过250篇。主要方向包括不同生态系统水文循环内部或水文要素之间水、物质、能量和生物之间的交互作用对水文连通性的影响、气候变化和人类活动背景下水文连通性的多尺度效应以及水文连通性与生态系统服务等方面^[42-50]。国内水文连通性方面的研究起步较晚,近些年研究成果呈增加趋势。随着对水文连通性认识的不断深入,相关方向的拓展不断加大,成熟的案例研究会逐渐增多。

(2)在研究内容方面,学者将现有研究水文连通性的内容分为5类,一是评价土壤-水分格局;二

是研究坡面径流格局和过程,三是包括地形控制(比如道路网络)对水文连通性和流域径流的影响,四是模型开发探索并预测水文连通性,五是制定反映水文连通性指标^[1]。水文连通性与生态过程、不同类型生态系统水文连通性对物质传输的影响、生态系统结构和功能的变化对水文连通性的影响等方面是较为成熟的研究热点。国外围绕水文连通性、景观连通性以及泥沙连通性在不同类型生态系统及不同尺度均开展了深入的研究。国内方面由于起步较晚,目前更多侧重于河湖生态系统水系连通演变及其驱动因素研究,围绕小流域综合治理,以及生态系统结构的改变对水文连通性的影响等方面相关报道较少,尤其是基于水文连通性评价人类活动对流域生态环境影响方面的研究还需加强。

(3)在研究方法方面,人们已总结了多种水文连通性的评价方法,包括基于水文监测指标的定位监测、基于关键水文过程的水文模型、反映景观类型和动态变化对水文连通性影响的景观格局指数以及结合数字化水系网络中的点、线拓扑关系的图论方法。目前开展多尺度水文连通性制图、地下水依赖型生态系统水文连通性表征、基于地理信息技术与长期野外监测资料开展多尺度水文连通性对生态系统的影响和模型模拟,是未来该领域研究的核心方法与技术手段^[51-54]。

参考文献:

- [1] BRACKEN L J, CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff dominated geomorphic systems [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13): 1749-1763.
- [2] ZHU Jie, WANG Xuan, ZHANG Qingwen, et al. Assessing wetland sustainability by modeling water table dynamics under climate change [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121293.
- [3] WOLSTENHOLME J M, SMITH M W, BAIRD A J, et al. A new approach for measuring surface hydrological connectivity [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(3): 538-552.
- [4] MORENO-DE-LAS-HERA M, MERINO-MARTÍN L, SACO P M, et al. Structural and functional control of surface-patch to hillslope runoff and sediment connectivity in Mediterranean dry reclaimed slope systems [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(5): 2855-2872.
- [5] LIU Jiakai, ENGEL B A, ZHANG Guifang, et al. Hydrological connectivity: One of the driving factors of plant communities in the Yellow River Delta [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106150.

- [6] YEO I Y, LEE S, LANG M W, et al. Mapping landscape – level hydrological connectivity of headwater wetlands to downstream waters: A catchment modeling approach – Part 2[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1557 – 1570.
- [7] KEESSTRA S D, DAVIS J, MASSELINK R H, et al. Coupling hysteresis analysis with sediment and hydrological connectivity in three agricultural catchments in Navarre, Spain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 1598 – 1612.
- [8] RAGAN A N, WOZNIAK J R. Linking hydrologic connectivity in salt marsh ponds to fish assemblages across a heterogeneous coastal habitat[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 35(3): 545 – 558.
- [9] MISHRA K, SINHA R, JAIN V, et al. Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 251 – 265.
- [10] SHAO Xiaojing, FANG Yu, JAWITZ J W, et al. River network connectivity and fish diversity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 21 – 30.
- [11] SINGH M, SINHA R. Evaluating dynamic hydrological connectivity of a floodplain wetland in North Bihar, India using geostatistical methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2473 – 2488.
- [12] BRACKEN L J, WAINRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas [J]. *Earth – Science Reviews*, 2013, 119: 17 – 34.
- [13] SACO P M, RODRÍGUEZ J F, HERAS M M D L, et al. Using hydrological connectivity to detect transitions and degradation thresholds: Applications to dryland systems [J]. *Catena*, 2020, 186: 104354.
- [14] LISEBY P E, FRYIRS K. “Out with the Old?” Why coarse spatial datasets are still useful for catchment – scale investigations of sediment (dis) connectivity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(10): 1588 – 1596.
- [15] PUIDEFABREGAS J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 133 – 147.
- [16] 何霄嘉, 王国庆, 鲍振鑫. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2): 1 – 5.
- [17] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 等. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(7): 2356 – 2364.
- [18] LLENA M, VERICAT D, CAVALLI M, et al. The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 899 – 912.
- [19] LÓPEZ – VICENTE M, NADAL – ROMERO E, CAMMERAAT E L H. Hydrological connectivity does change over 70 years of abandonment and afforestation in the Spanish Pyrenees [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(4): 1298 – 1310.
- [20] AMEZCUA F, RAJNOHOVA J, FLORES – DE – SANTIAGO F, et al. The effect of hydrological connectivity on fish assemblages in a floodplain system from the South – East Gulf of California, Mexico [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 240.
- [21] MESSENZEHL K, HOFFMANN T, DIKAU R. Sediment connectivity in the high – alpine valley of Val Mütsch, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling [J]. *Geomorphology*, 2014, 221: 215 – 229.
- [22] GARBIN S, CELEGON E A, FANTON P, et al. Hydrological controls on river network connectivity [J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(2): 181428.
- [23] NAPIÓRKOWSKI P, BĄKOWSKA M, MROZIŃSKA N, et al. The Effect of Hydrological Connectivity on the Zooplankton Structure in Floodplain Lakes of a Regulated Large River (the Lower Vistula, Poland) [J]. *Water*, 2019, 11(9): 1924.
- [24] MIYATA S, GOMI T, SIDLE R C, et al. Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: Implications for hydrological connectivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 148 – 159.
- [25] LU Xiaoyu, LI Yingkui, WASHINGTON – ALLEN R A, et al. Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1479 – 1494.
- [26] CISLAGHI A, BISCHETTI G B. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous – forested hillslopes: A probabilistic approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1168 – 1186.
- [27] LEXARTZA – ARTZA I, WAINWRIGHT J. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications [J]. *Catena*, 2009, 79(2): 146 – 152.
- [28] BRACKEN L J, CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its distribution to understanding runoff – dominated geomorphic systems [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13): 1749 – 1763.
- [29] PRINGLE C M. Hydrological connectivity and the management of biological reserves: a global perspective [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 981 – 998.
- [30] PRINGLE C M. What is hydrological connectivity and why

- is it ecologically important? [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2685–2689.
- [31] LUDWIG J A, WILCOX B P, BRESHEARS D D, et al. Vegetation patches and runoff – erosion as interacting eco-hydrological processes in semiarid landscapes[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 288–297.
- [32] LARSEN L G, CHOI J, NUNGESSER M K, et al. Directional connectivity in hydrology and ecology[J]. *Ecological Applications*, 2012, 22(8): 2204–2220.
- [33] BRIERLEY G, FRYIRS K, JAIN V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications[J]. *Area*, 2006, 38(2): 165–174.
- [34] FRESSARD M, COSSART E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: Development and application in the Mercurey vineyards (France)[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2566–2584.
- [35] JANCEWICZ K, MIGOŃP, KASPRZAK M. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by topographic wetness index[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 1046–1062.
- [36] LÓPEZ – VICENTE M, BEN – SALEM N. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 179–191.
- [37] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 31(1): 112–122.
- [38] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源–汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406–2413.
- [39] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 586–594.
- [40] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局–土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 267–275.
- [41] DOCHARTAIGH B É Ó, ARCHER N A L, PESKETT L, et al. Geological structure as a control on floodplain groundwater dynamics [J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27: 703–716.
- [42] BECK W J, MOORE P L, SCHILLING K E, et al. Changes in lateral floodplain connectivity accompanying stream channel evolution: Implications for sediment and nutrient budgets[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1015–1028.
- [43] JAMES L A, MONOHAN C, ERTIS B. Long – term hydraulic mining sediment budgets: Connectivity as a management tool[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2024–2035.
- [44] ORTÍZ – RODRÍGUEZ A J, MUÑOZ – ROBLES C, BORSELLI L. Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, Mexico[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 112–128.
- [45] WOHL E, BRIERLEY G, CADOL D, et al. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 44(1): 4–26.
- [46] SORACCO C G, VILLARREAL R, MELANI E M, et al. Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of conventional and no – till systems determined using a simple laboratory device[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1236–1244.
- [47] ZHANG Zhicai, CHEN Xi, CHENG Qinbo, et al. Storage dynamics, hydrological connectivity and flux ages in a karst catchment: conceptual modelling using stable isotopes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(1): 51–71.
- [48] SCHOPPER N, MERGILI M, FRIGERIO S, et al. Analysis of lateral sediment connectivity and its connection to debris flow intensity patterns at different return periods in the Fella River system in northeastern Italy[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 1586–1600.
- [49] RAI S P, SINGH D, SAINI R K, et al. Possibility of hydrological connectivity between Manasarovar Lake and Gangotri Glacier[J]. *Current Science*, 2019, 116(7): 1062–1067.
- [50] NEILL A J, TETZLAFF D, STRACHAN N J C, et al. To what extent does hydrological connectivity control dynamics of faecal indicator organisms in streams? Initial hypothesis testing using a tracer – aided model[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 423–435.
- [51] ESTRANY J, RUIZ M, CALSAMIGLIA A, et al. Sediment connectivity linked to vegetation using UAVs: High – resolution imagery for ecosystem management[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 1192–1205.
- [52] 刘鹄, 赵文智, 李中恺. 地下水依赖型生态系统生态水文研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 741–750.
- [53] CAVALLI M, VERICAT D, PEREIRA P. Mapping water and sediment connectivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 763–767.
- [54] FOERSTER S, WILCZOK C, BROSINSKY A, et al. Assessment of sediment connectivity from vegetation cover and topography using remotely sensed data in a dryland catchment in the Spanish Pyrenees[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2014, 14(12): 1982–2000.