

# 基于文献计量学的溪流大型底栖无脊椎动物群落研究现状及热点分析

汪兴中<sup>1</sup>, 谭 香<sup>2</sup>, 郑 穗<sup>1</sup>

(1. 湖州师范学院水生生物资源养护与开发技术研究浙江省重点实验室, 湖州 313000;

2. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:**全面梳理溪流大型底栖无脊椎动物群落的研究热点和演化路径,以期为溪流生态系统研究提供有价值的参考及对未来研究方向的启示。以 Web of Science 核心合集数据库中 2009–2018 年的 2416 篇文献为原始数据,基于文献计量学分析方法,探索溪流大型底栖无脊椎动物群落研究热点,归纳研究主题。研究发现:(1)溪流大型底栖无脊椎动物群落研究的论文数量总体上呈上升趋势,主要研究力量来自美国;(2)土地利用、水质和生物多样性等为溪流大型底栖无脊椎动物群落主要研究热点;(3)近 10 年来溪流大型底栖无脊椎动物群落研究主题为以下 6 大类:以水质为代表的环境因子与大型底栖无脊椎动物群落关系研究、以比较分析为手段的  $\beta$  生物多样性研究、多重环境压力对大型底栖无脊椎动物群落的影响研究、大型底栖无脊椎动物群落长期响应研究、季节性河流研究和大型底栖无脊椎动物群落生物特征研究等。

**关键词:**底栖动物; 文献计量分析; 研究趋势; 知识图谱; 研究热点

**中图分类号:**Q178    **文献标志码:**A    **文章编号:**1674-3075(2021)02-0107-09

河流是生态环境健康、经济财富和人类福祉的重要来源(Grill et al, 2019; 沈振锋等, 2019)。然而有研究表明,全球 65% 的河流,以及依靠河水维持的水生生境已经受到人类活动的强烈威胁(Vörösmarty et al, 2010)。而对于受损河流的水生生物群落恢复项目,比如欧洲的欧洲水框架指南(Water Framework Directive 2000/60/EC in Europe)和美国的清洁水法(Clean Water Act in the USA)却耗资巨大,难以实现项目目标(Jourdan et al, 2019)。这要求研究者对河流生态系统进行更深入的研究,特别是位于源头的河流或溪流。大型底栖无脊椎动物群落是河流/溪流食物网中的重要消费者,是溪流生态系统最基本的组成部分,肉眼可见并且分布广泛(Barbour et al, 1999),因此研究者对大型无脊椎动物的研究非常多。再则,河流生态系统又是地球上最复杂的生态系统之一,且与自然环境的任何一部分都有直接或者间接的、或多或少的联系(谭香和张全发, 2018)。而溪流中大型底栖动物可以对所处自然环境产生各种响应,且具有采样

简单,容易分类等诸多优点,常作为生物监测和生态问题研究对象(Bonada et al, 2006)。并且大型底栖无脊椎动物种类众多,主要包括水生昆虫、软体动物、部分扁形动物(涡虫)、部分环节动物(寡毛类和水蛭)、部分线形动物(线虫)和部分甲壳动物(蟹)等(刘健康, 1999),具有较好的研究前景。因此,对溪流大型底栖动物群落研究进行综述总结及梳理非常重要,可以为溪流生态系统研究提供非常有价值的参考及对未来研究方向的启示。

文献综述可以帮助研究者了解并推动底栖动物群落研究的发展,但是面对庞大的文献群,以文献阅读、作者总结归纳、主观的定性探讨为主要方法的传统文献综述存在明显的局限性。随着科学计量学、数据和信息可视化的发展,对文献计量可视化分析可以弥补传统文献综述的不足,可以客观全面反映综述对象的发展脉络及趋势,得到了广泛的应用(Chen, 2017; 郭劲松等, 2018; 祝薇等, 2018)。然而,目前国内对大型底栖无脊椎动物群落方面的研究仍缺乏文献计量分析。因此本研究基于近 10 年(2009–2018)Web of Science 数据库核心合集,对溪流大型底栖无脊椎动物群落相关文献进行全面梳理,旨在探索 3 个方面的问题:(1)底栖大型无脊椎动物群落研究发文数量情况及各国家研究力量对比;(2)底栖大型无脊椎动物群落目前研究热点及研

收稿日期:2019-07-12

基金项目:湖州师范学院校级课题资助(2019XJKJ39)。

作者简介:汪兴中,1985 年生,男,讲师,博士,主要从事底栖动物群落研究。E-mail: 02133@zjhu.edu.cn

通信作者:谭香。E-mail: xtan@wbgcas.cn

究发展趋势;(3)底栖大型无脊椎动物群落研究主题及演化路径。

## 1 数据来源与分析方法

### 1.1 数据来源

以 Web of Science 数据库中的核心合集为数据来源进行文献检索。文献检索式:主题=“macroinvertebrate community” AND “stream”。检索时间段为 2009–2018 年,共检索得到 2 416 篇文献。每篇文献的数据内容包括:文献类型(PT),发表年份(PY),作者(AU),作者地址(CI),期刊名称(JN),关键词(DE),摘要(AB)和参考文献(CR)。

### 1.2 数据分析方法

文献计量分析运用 CiteSpace5.3R4 软件进行,该软件是着眼于分析科学文献中蕴含的潜在知识,并在科学计量法、数据和信息可视化背景下逐渐发展起来的一款多元、分时、动态的引文可视化分析软件(Chen, 2006; Chen, 2017)。基于共引分析和寻径网络算法的可视化图谱,可以用来寻找开创性和标志性文献,主流主题和演化趋势等,并具有重复性,有效避免由于研究者研究水平无法客观全面反映研究领域发展脉络的问题。软件分析过程中,设置分析年限为 2009–2018 年,以 1 年为时间分区,分析节点类型依次为国家、关键词和参考文献。

领域研究力量采用发文数量和文献中心度进行对比。文献中心度是发现和衡量文献重要性的指标,中心度越高,文献重要性也越大(一般中心度高于 0.1 被认为文献较重要)。具有高中心度的文献通常是连接 2 个不同领域的关键枢纽,该指标主要受文献引用关系的影响。领域研究热点及趋势采用关键词出现频率和共现性进行分析。研究主题的确立基于文献共被引分析,即 2 篇文献共同出现在第 3 篇施引文献的参考文献中(Chen, 2006),并以聚类的方式展现。参考文献聚类的显著性采用网络模块化评价指标 Modularity 值( $Q$  值)和网络同质化指标 Silhouette 值检验。 $Q$  的取值区间为  $0 \sim 1$ , $Q > 0.3$  时就意味着网络结构是显著的。Silhouette 值越接近 1,反映网络的同质性越高,Silhouette 为 0.7 时,聚类结果是高信度的。

## 2 结果分析

### 2.1 研究发文情况及研究力量对比

2009–2018 年期间,溪流大型底栖无脊椎动物群落研究的论文数量总体呈上升趋势(图 1),年平

均产出论文 242 篇。

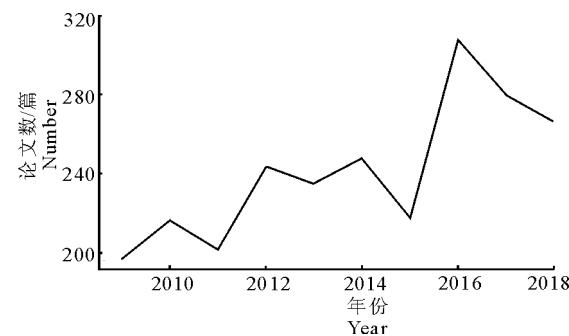


图 1 溪流大型底栖无脊椎动物群落研究的发文数量(2009–2018 年)

Fig.1 Annual number of published papers on stream macroinvertebrate community research from 2009 to 2018

从研究力量看,美国在溪流大型底栖无脊椎动物群落研究领域发文数量最多(699 篓),而且比排名第 2 的西班牙(214 篓)高出 3 倍多(表 1),且文献中心度(0.2)与德国并列最高。可见,美国在该领域研究基础较好,影响深远。德国和法国虽然发文数量排名第 3 和第 7,但是其文献中心度较高,为 0.2 和 0.19(表 1),在该领域也有较高的影响力。而中国发文量仅 113 篓,排第 8,且文献中心度较低,为 0.04(表 1)。这与美国的研究力量差距很大,也与国内在生态风险领域研究方面的研究力量排名(祝薇等,2018)差距较大。因此,对溪流大型底栖无脊椎动物群落研究进行文献计量分析,加快国内溪流大型底栖无脊椎动物群落研究非常有必要。

表 1 发文章数量前 10 名的国家

Tab.1 Top 10 countries by number of papers published on macroinvertebrates

国家	发文量/篇	中心度
美国	699	0.20
西班牙	214	0.06
英国	179	0.14
德国	167	0.20
澳大利亚	161	0.13
巴西	148	0.04
法国	129	0.19
中国	113	0.04
加拿大	112	0.03
新西兰	110	0.10

在发文量前 10 的机构中,美国占了 3 家,分别为美国地质调查局(US Geol Survey)62 篓,俄勒冈州立大学(Oregon State Univ)45 篓和美国环保局(US EPA)40 篓(表 2)。芬兰占了 2 家,分别为奥卢大学(Univ Oulu)52 篓和芬兰环境研究所(Finnish Environm Inst)31 篓(表 2)。其他国家各占

1家,其中中国科学院(Chinese Academy of Science)35篇,排名第8(表2)。中心度在0.1以上的机构有巴塞罗那大学(Univ Barcelona)(0.22),美国地质调查局(US Geol Survey)(0.1),俄勒冈州立大学(Oregon State Univ)(0.17)和美国环保局(US EPA)(0.11),其所发表论文具有重要学术价值。

表2 发文量前10的机构

Tab.2 Top 10 institutions by number of papers published on macroinvertebrates

机构	发文量/篇	中心度
巴塞罗那大学	73	0.22
美国地质调查局	62	0.10
奥卢大学	52	0.06
俄勒冈州立大学	45	0.17
伯明翰大学	44	0.07
杜伊斯堡-埃森大学	41	0.02
美国环保局	40	0.11
中国科学院	35	0.01
科英布拉大学	34	0.03
芬兰环境研究所	31	0.03

## 2.2 研究热点及趋势

关键词是对文献内容和主题的浓缩,CiteSpace软件的时区演化图能直观反映不同时间段关键词的频度和共现关系(Chen, 2006; 祝薇等, 2018)。因此,我们使用关键词频度和时区演化图研究溪流大型底栖无脊椎动物群落领域的研究前沿及其衍生关系,进而对未来的发展方向作出合理的预测(图2)。图中节点大小代表关键词出现频率,节点间的连线代表其共现关系。研究结果显示,土地利用、水质和生物多样性等为以往十年来的主要研究的领域(研究热点),频次分别为378、368和324(表3,图2)。

溪流大型底栖无脊椎动物群落近10年研究的热点分类,主要分为3类(表3):(1)与大型底栖无脊椎动物群落相关的环境因子。这与群落生态学主要关心的问题,即确认与生物群落构建相关的环境因子(生物和非生物因子)相一致(Bernadou et al, 2013)。热点关键词主要为土地利用、水质、生境、干扰、鱼类和气候变化等,频次分别为378、368、211、202、168和140。突现性的关键词依次为细泥沙、热带溪流、环境梯度、鱼类群落、城镇化、多重环境压力、有机物和景观。(2)溪流大型底栖无脊椎动物群落主要特征,主要为生物多样性、食物网、物种丰富度和物种特征等,频次分别为324、117、110和109。突现性的关键词依次为功能摄食类群、群落动态、分解和生物完整性。(3)溪流大型底栖无脊椎动物群落应用,主要为生物评价、保护和生物监测等,频次分别为148、93和73。突现性的关键词依次为生物监测和修复。

## 2.3 研究主题及演化路径

我们对原始数据的参考文献共被引网络进行聚类,从每一个类别文献中的关键词中提取术语为该聚类类别命名,并以时间线视图呈现(表4,图3)。聚类图中节点较大的文献代表主题内重要文献,根据其在时间上的分布,可以合理推测主题演化路径。本研究聚类图谱的Q值为0.6511,网络结构显著。且聚类图谱的每个主题内部成员数目合理,6个主题的Silhouette值分别为0.807、0.846、0.811、0.802、0.937和0.796,均高于0.7,聚类结果是高信度的(表4)。综合Q值和Silhouette值,表明溪流

表3 高频和具有突现性的关键词信息

Tab.3 Table of high frequency and breakout keywords

类别	关键词			
	突现性关键词		高频关键词	
与大型底栖无脊椎动物群落相关的环境因子	细泥沙(13.68)	土地利用(378)	水质(368)	生境(211)
	热带溪流(12.38)	干扰(202)	鱼类(168)	气候变化(140)
	环境梯度(11.25)	多重环境压力(59)	有机物(57)	空间尺度(56)
	鱼类群落(10.08)	细泥沙(55)	城镇化(51)	沉积物(49)
	城镇化(7.95)	景观(48)	叶片凋落物(32)	干旱(31)
	多重环境压力(7.4)	环境梯度(28)	热带溪流(27)	流量(26)
大型底栖无脊椎动物群落的主要特征	有机物(5.45)	鱼类群落(22)	重金属(21)	营养盐(18)
	景观(2.91)	温度(18)	杀虫剂(13)	河岸带植被(11)
	功能摄食类群(7.91)	生物多样性(324)	食物网(117)	物种丰富度(110)
	群落动态(5.58)	物种特征(109)	生物完整性(65)	群落动态(47)
	分解(4.31)	功能摄食类群(43)	β多样性(36)	分解(25)
大型底栖无脊椎动物群落应用	生物完整性(3.65)	特征(19)	物种扩散(10)	
	生物监测(6.02)	生物评价(148)	保护(93)	生物监测(73)
	修复(2.48)	修复(36)	生物指示(29)	

注:括号内为频次。

Note: Values in the parenthesis denote the occurring frequency.

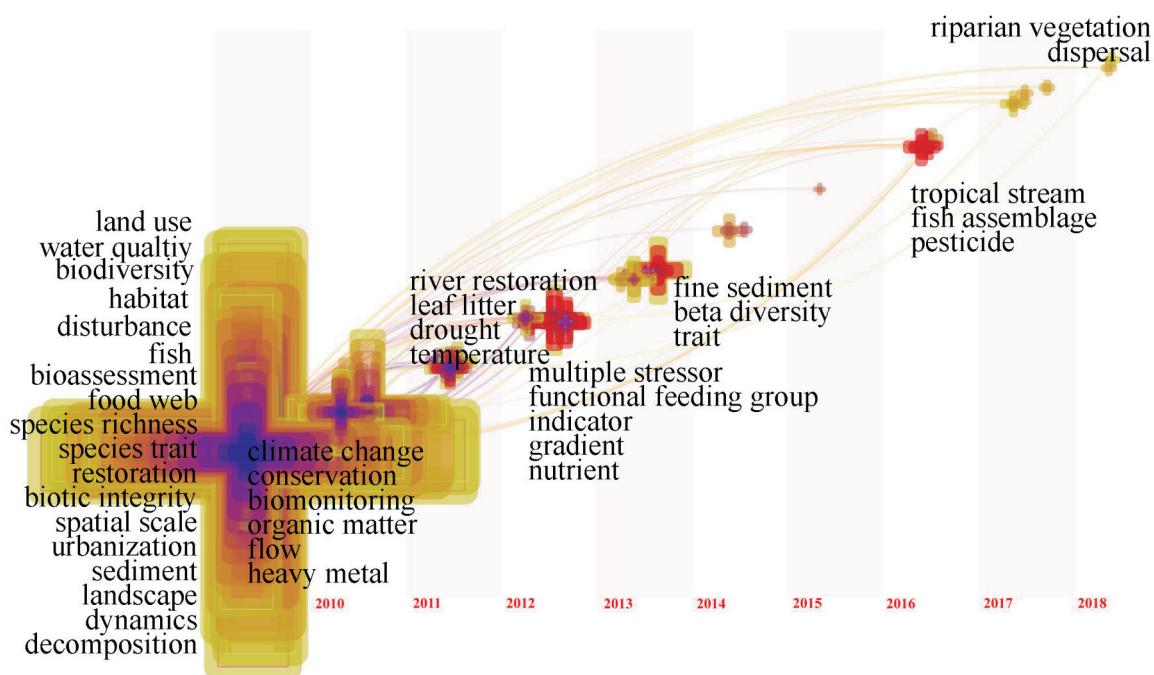


图 2 热点关键词时区演化

**Fig.2 Chronology of hot keywords**

大型底栖无脊椎动物群落研究主题明确,各聚类间

的相似度较低,可以明确分为 6 个主题集群。因此

结合图 3 和文献阅读, 确定溪流大型底栖无脊椎动

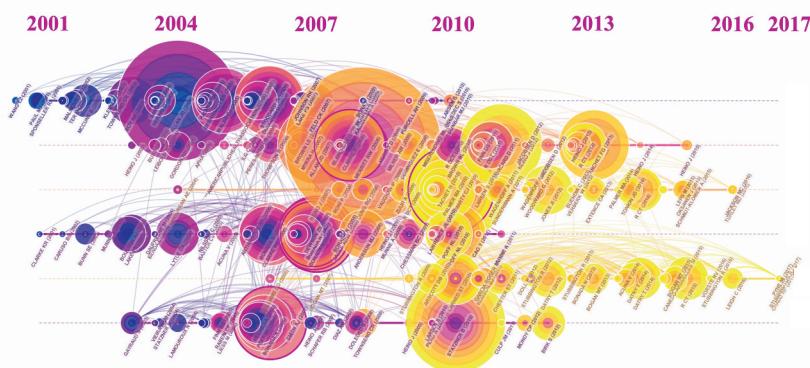
物群落研究主题及演化路径。

根据聚类图谱, 溪流大型底栖无脊椎动物群落研究主题可以分为 6 类(表 4, 图 3)。a 以水质为代

表 4 文献共被引聚类信息

**Tab.4** Information on clusters of co-cited literature

编号	聚类主题	聚类大小	聚类轮廓值	重要文献
a	以水质为代表的环境因子与环境因子关系研究	47	0.807	Zhang et al,2010; Hutchens et al,2009
b	以比较分析为手段的 $\beta$ 多样性研究	26	0.846	Heino,2011; Heino et al,2015
c	多重环境压力对大型底栖无脊椎动物群落影响研究	41	0.811	Leps et al,2015; Baumgartner & Robinson,2015
d	大型底栖无脊椎动物群落长期响应研究	18	0.802	Grantham et al,2010; Lawrence et al,2010
e	季节性河流研究	13	0.937	Stubbington et al,2017; Datry et al,2016
f	大型底栖无脊椎动物群落生物特征研究	6	0.796	Statzner et al,2010; Menezes et al,2010



注:a.水质; b.比较分析; c.多重环境压力; d.大型底栖无脊椎动物长期响应; e.季节性河流; f.大型底栖无脊椎动物群落生物特征

图 3 文献共被引聚类时间线

a.water quality; b.comparative analysis; c.multiple stressor environment; d.long – term macroinvertebrate responses;  
e.intermittent flow; f.biological invertebrate trait

**Fig.3** Chronology of co-cited literature clusters

表的环境因子与大型底栖无脊椎动物群落关系研究,主要研究不同空间尺度下大型底栖无脊椎动物群落与环境因子的关系(Zhang et al, 2010; Hutchens et al, 2009)。b 以比较分析为手段的  $\beta$  生物多样性研究,代表文献为不同空间尺度下的多样性格局及其与生态因子关系的综述(Heino, 2011; Heino et al, 2015)。c 多重环境压力对大型底栖无脊椎动物群落的影响研究,代表文献为不同空间尺度下的调查以及围隔实验研究大型底栖无脊椎动物群落与多重环境因子的关系(Leps et al, 2015; Baumgartner & Robinson, 2015)。d 大型底栖无脊椎动物群落长期响应研究,代表文献为长期气候条件下的大型底栖无脊椎动物群落响应(Grantham et al, 2010; Lawrence et al, 2010)。e 季节性河流研究,主要研究水文节律对季节性河流中大型底栖无脊椎动物群落的影响(Stubbington et al, 2017; Datry et al, 2016)。f 大型底栖无脊椎动物群落特征研究,代表文献为大型底栖无脊椎动物生物特征作为多重环境压力指示和淡水生物监测工具的综述(Statzner & Béche, 2010; Menezes et al, 2010)。

从主题演化路径看,主题 a 重要文献出现较早,该主题早期关注城镇化带来的环境变化对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Roy et al, 2003),重点研究了土地利用对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Allan, 2004)。后期发现除了水质以外,物理扰动和物理生境对大型底栖无脊椎动物群落的关系也很密切(Bona et al, 2008; Dunbar et al, 2010)。该主题 2010 年之后未出现重要文献,根据图谱我们认为该主题朝主题 b 和 c 两个方向发展(图 3)。

主题 b 是对主题 a 中生物多样性(Dudgeon et al, 2006)和不同空间尺度研究(Feld & Hering, 2007)的发展。该主题早期研究不同尺度下多样性格局关系(Heino et al, 2003),使用集合群落(meta-community)的概念来思考不同空间尺度的多样性关系(Leibold et al, 2004)。后期探索影响不同尺度下多样性格局关系的环境因素(Thompson & Townsend, 2006; Mykrä et al, 2007; Brown & Swan, 2010),应用于环境评价研究中(Heino, 2013),并用不同尺度数据来验证集合群落的  $\beta$  多样性与生态因子之间的关系(Heino et al, 2015)。主题 c 是主题 a 中物理生境对大型底栖无脊椎动物群落影响研究的延续,比如研究物理生境中的底质对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Extence et al, 2013)。该主题比主题 a 考虑的环境因子要多,探索

多重环境因子对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Leps et al, 2015; Wagenhoff et al, 2011)。

主题 d 重要文献出现较早,早期主要研究长时间尺度上水文事件(比如干旱)对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Lytte & Poff, 2004; Acuña et al, 2005)。后期研究水文节律更替对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Poff et al, 2010),并探索年际间气候变化带来的季节水文更替的影响(Munné & Prat, 2011)。由于季节性河流对水文变化较为敏感,因此主题 d 向主题 e 季节性河流演化,出现季节性河流生态学的概念(Larned et al, 2010)。主题 e 前期考虑季节性河流空间尺度和时间尺度上干旱对大型底栖无脊椎动物群落的影响(Chester & Robinson et al, 2011; Datry, 2012),后期研究大型底栖无脊椎动物群落对干旱的抵抗力和恢复力(Bogan et al, 2015; Leigh et al, 2016)。

主题 f 与前 5 个主题有着协同演化的关系(图 3)。前期与主题 a 和 d 一致,关注生物特征在空间尺度与生境特征的关系及时间尺度上与水文特征的研究(Lamouroux, 2004; Béche et al, 2006)。后期与主题 b 和 c 一致,综述总结了生物特征在生物多样性和多重环境压力方面的应用(Statzner & Béche, 2010; Heino, 2009)。主题 e 也存在发展合适的生物特征参数评价季节性河流生态状况的演化趋势(Skoulakidis et al, 2017)。

### 3 讨论

2009–2018 年,大型底栖无脊椎动物群落研究论文上升趋势与相关水环境和生态类研究的趋势相一致,比如三峡水环境相关研究(郭劲松等,2018)和生态风险研究(祝薇等,2018),这说明国际社会越来越重视对环境生态方面的研究,也可能跟欧洲水框架指南、美国净水法案等项目持续推动有关。年平均发文方面,溪流大型底栖无脊椎动物群落研究比三峡环境相关研究(郭劲松等,2018)和生态风险研究(祝薇等,2018)多。这可能与大型底栖无脊椎动物群落在生态系统中的重要性以及非常适合作为生物监测和生态问题研究对象的特性有关,也与河流的特性、重要性以及目前所处较高污染风险有关。从研究力量看,我国在这方面研究的发文量和影响力依然相对较弱,因此我国研究机构在此领域还是有很大的提升和突破空间,任重道远。

从关键词信息表和热点关键词时区演化图看,溪流大型底栖无脊椎动物群落研究可能存在两点趋

势:(1)研究热点往便利溪流生态管理,也即管理政策及条款更容易量化和落实的方向发展。比如,早期出现较多土地利用和水质影响大型底栖无脊椎动物群落的研究(Zhang et al,2010),而后期出现较多河岸带植被与大型底栖无脊椎动物群落的研究(Morase et al,2014;Giling et al,2015),河岸带植被是流域管理更直接相关的也较容易实现的方面。(2)研究热点往更好地解释群落结构机理方向发展。比如,影响大型底栖无脊椎动物群落结构研究往多环境因素共同控制方向发展,并认为单因素环境因子不能解释大型底栖无脊椎动物群落结构(Mantyka-Pringle et al,2014)。生物多样性研究热点趋势从 $\alpha$ 多样性指数到 $\beta$ 生物多样性,到解释多样性形成机制的生物扩散发展(图2)。

近10年溪流大型底栖无脊椎动物群落主要研究主题是探讨空间和时间上大型底栖无脊椎动物群落与环境因子的关系。空间上,研究主题趋向于构建完善的大型底栖无脊椎动物群落结构和功能与环境因子的网状相互关系结构,及探讨构建这种关系网络需要的重要的或未被发现的关系。比如近年逐渐被生态学家认识和应用的结构方程模型(structural equation model,SEM),因可以提供这种网状相互关系而显示良好的发展势头(王酉石和储诚进,2011;Bazzi et al,2013)。基于在河流生态学及大型无脊椎动物领域多年的研究,发展生物群落与环境因子关系网络将是当今群落生态学的发展方向(Morin,2010)。时间上,研究主题从主要关注水文与大型底栖无脊椎动物群落关系趋向于考虑包括水文因素在内的多种环境因子与大型底栖无脊椎动物群落关系。比如,在研究干旱事件对大型底栖无脊椎动物群落的影响上考虑空间尺度(Datry et al,2016),并认为集合群落动态是季节性河流研究的挑战(Skoulidakis et al,2017)。其次,由于大型底栖动物是河流食物网中的初级消费者,最重要的消费者之一,是河流食物网中承上启下的中间环节,大型底栖动物的群落结构及生物学特性有任何改变都将影响上层消费者的结构及整个食物网的结构。因此该领域的研究未来可能更多关注在全球气候变化的背景下,大型底栖动物在河流食物网中的作用及其在河流生态系统中碳来源及转运中的作用。另外,在全球人类干扰强度日益增强的今天,各种生物类群比如大型底栖无脊椎动物的生物多样性维持机制也是需要我们持续关注和研究的方向。最后,结合大型底栖无脊椎动物群落研究热点和主题,我们认为

大型底栖无脊椎动物群落研究具有以下2个特点:(1)具有较高的现实应用性,这也是群落生态学的前沿(Morin,2010);(2)具有综合性,比如水文生态交界面因显著受到全球水文、生物地化循环、污染和生态系统恢复性的综合影响而成为生态系统过程的研究热点(Krausel et al,2017)。

## 参考文献

- 郭劲松,陈海燕,李哲等,2018. 三峡水库水环境相关研究文献计量分析与未来展望[J]. 湖泊科学,30(5): 1177–1186.
- 刘建康,1999. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社:241–259.
- 沈振锋,黄子纯,周杰,等,2019. 基于HistCite的河流修复研究历史引文分析[J]. 水生态学杂志,40(3): 83–91.
- 谭香,张全发,2018. 底栖硅藻应用于河流生态系统健康评价的研究进展[J]. 水生生物学报,42(1): 212–220.
- 王酉石,储诚进,2011. 结构方程模型及其在生态学中的应用[J]. 植物生态学报,35(3): 337–344.
- 祝薇,向雪琴,候丽朋,等,2018. 基于Citespace软件的生态风险知识图谱分析[J]. 生态学报,38(12): 4504–4515.
- Acuña V,Muñoz I,Giorgi A,et al,2005. Drought and post-drought recovery cycles in an intermittent Mediterranean stream: structural and functional aspects[J]. Journal of the North American Benthological Society, 24(4): 919–933.
- Allan J D,2004. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35: 257–284.
- Barbour M T,Gerritsen J,Snyder B D,et al,1999. Rapid bio-assessment protocols for use in wadeable streams and rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish [M]. 2nd edition. Washington, D.C.: EPA 814-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards.
- Baumgartner S D,Robinson C T,2015. Land-use legacy and the differential response of stream macroinvertebrates to multiple stressors studied using in situ experimental mesocosms[J]. Freshwater Biology,60: 1622–1634.
- Béche L A,Mcelravy E P,Resh V H,2006. Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic-macro-invertebrates in two Mediterranean-climate streams in California,U.S.A.[J]. Freshwater Biology,51: 56–75.
- Bernadou A,Céréghino R,Barbet H,et al,2013. Physical and land-cover variables influence ant functional groups and species diversity along elevational gradients[J]. Landscape Ecology,28(7): 1387–1400.
- Bazzi S, Surridge B W J, Lerner D N, 2013. Structural equa-

- tion modelling: A novel statistical framework for exploring the spatial distribution of benthic macroinvertebrates in riverine ecosystems[J]. *River Research and Applications*, 29(6): 743–759.
- Bogan M T, Boersma K S, Lytle D A, 2015. Resistance and resilience of invertebrate communities to seasonal and supraseasonal drought in arid-land headwater streams [J]. *Freshwater Biology*, 60(12): 2547–2558.
- Bona F, Falasco E, Fenoglio S, et al, 2008. Response of macroinvertebrate and diatom communities to human-induced physical alteration in mountain streams[J]. *River Research and Applications*, 24: 1068–1081.
- Bonada N, Prat N, Resh V H, et al, 2006. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches[J]. *Annual Review of Entomology*, 51: 495–523.
- Brown B L, Swan C M, 2010. Dendritic network structure constrains metacommunity properties in riverine ecosystems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 79: 571–580.
- Chen C, 2006. CiteSpace II : Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3): 359–377.
- Chen C, 2017. Science mapping: A systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2 (2): 1–40.
- Chester E T, Robson B J, 2011. Drought refuges, spatial scale and recolonisation by invertebrates in non-perennial streams[J]. *Freshwater Biology*, 56: 2094–2104.
- Datry T, Moya N, Zubieta J, et al, 2016. Determinants of local and regional communities in intermittent and perennial headwaters of the Bolivian Amazon[J]. *Freshwater Biology*, 61(8): 1335–1349.
- Datry T, 2012. Benthic and hyporheic invertebrate assemblages along a flow intermittence gradient: effects of duration of dry events[J]. *Freshwater Biology*, 57: 563–574.
- Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, et al, 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges[J]. *Biological Reviews*, 81: 163–182.
- Dunbar M J, Pedersen M L, Cadman D, et al, 2010. River discharge and local-scale physical habitat influence macroinvertebrate LIFE scores [J]. *Freshwater Biology*, 55 (1): 226–242.
- Extence C A, Chadd R P, England J, et al, 2013. The assessment of fine sediment accumulation in rivers using macroinvertebrate community response[J]. *River Research and Applications*, 29(1): 17–55.
- Feld C K, Hering D, 2007. Community structure or function: effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales[J]. *Freshwater Biology*, 52: 1380–1399.
- Giling D P, Nally R M, Thompson R M, 2015. How sensitive are invertebrates to riparian-zone replanting in stream ecosystems? [J]. *Marine and Freshwater Research*, 67: 1500–1511.
- Grantham T E, Merenlender A M, Resh V H, 2010. Climatic influences and anthropogenic stressors: an integrated framework for streamflow management in Mediterranean-climate California, U.S.A. [J]. *Freshwater Biology*, 55: 188–204.
- Grill G, Lehner B, Thieme M, et al, 2019. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. *Nature*, 569: 215–221.
- Heino J, Melo A S, Bini L M, et al, 2015. A comparative analysis reveals weak relationships between ecological factors and beta diversity of stream insect metacommunities at two spatial levels[J]. *Ecology and Evolution*, 5 (6): 1235–1248.
- Heino J, Muotka T, Paavola R, 2003. Determinants of macroinvertebrate diversity in headwater streams: regional and local influences[J]. *Journal of Applied Ecology*, 72: 425–434.
- Heino J, 2011. A macroecological perspective of diversity patterns in the freshwater realm[J]. *Freshwater Biology*, 56: 1703–1722.
- Heino J, 2009. Biodiversity of aquatic insects: spatial gradients and environmental correlates of assemblage-level measures at large scales[J]. *Freshwater Reviews*, 2: 1–19.
- Heino J, 2013. The importance of metacommunity ecology for environmental assessment research in the freshwater realm[J]. *Biological Reviews*, 88(1): 166–178.
- Hutchens J J, Schultdt J A, Richards C, et al, 2009. Multi-scale mechanistic indicators of Midwestern USA stream macroinvertebrates [J]. *Ecological Indicators*, 9: 1138–1150.
- Jourdan J, Plath M, Tonkin J D, et al, 2019. Reintroduction of freshwater macroinvertebrates: challenges and opportunities[J]. *Biological Reviews*, 94: 368–387.
- Krausel S, Lewandowski J, Grimm N B, et al, 2017. Eco-hydrological interfaces as hot spots of ecosystem processes[J]. *Water Resources Research*, 53, 6359–6376.
- Lamouroux N, 2004. Biological traits of stream macroinvertebrate communities: effects of microhabitat, reach, and basin filters[J]. *Journal of the North American Bentho-*

- logical Society, 23(3), 449–466.
- Larned S T, Datry T, Arscott D B, et al, 2010. Emerging concepts in temporary-river ecology[J]. Freshwater Biology, 55: 717–738.
- Lawrence J E, Lunde K B, Mazor R D, et al, 2010. Long-term macroinvertebrate responses to climate change: implications for biological assessment in mediterranean-climate streams[J]. Journal of the North American Benthological Society, 29(4): 1424–1440.
- Leibold M A, Holyoak M, Mouquet N, et al, 2004. The meta-community concept: a framework for multi-scale community ecology[J]. Ecology Letters, 7: 601–613.
- Leigh C, Bonada N, Boulton A J, et al, 2016. Invertebrate assemblage responses and dual roles of resistance and resilience to drying in intermittent rivers[J]. Aquatic Sciences, 78: 291–301.
- Leps M, Tonkin J D, Dahm V, et al, 2015. Disentangling environmental drivers of benthic invertebrate assemblages: The role of spatial scale and riverscape heterogeneity in a multiple stressor environment[J]. Science of the Total Environment, 536: 546–556.
- Lytle D A, Poff N L, 2004. Adaptation to natural flow regimes[J]. Trends in Ecology and Evolution, 19(2): 94–100.
- Mantyka-Pringle C, Martin T G, Moffatt D B, et al, 2014. Understanding and predicting the combined effects of climate change and land-use change on freshwater macroinvertebrates and fish[J]. Journal of Applied Ecology, 51: 572–581.
- Menezes S, Baird D J, Soares A M V M, 2010. Beyond taxonomy: a review of macroinvertebrate trait-based community descriptors as tools for freshwater biomonitoring [J]. Journal of Applied Ecology, 47: 711–719.
- Morase A B, Wilhelm A E, Boelter T, et al, 2014. Reduced riparian zone width compromise aquatic macroinvertebrate communities in stream of southern Brazil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 186: 7063–7074.
- Morin P J, 2010. Emerging frontiers of community ecology [M]. In: Verhoef HA, Morin PJ, (eds). Community Ecology Processes, Models, and Applications. New York: Oxford University Press Inc, 193–201.
- Munné A, Prat N, 2011. Effect of Mediterranean climate annual variability on stream biological quality assessment using macroinvertebrate communities[J]. Ecological Indicators, 11: 651–662.
- Mykrä H, Heino J, Muotka T, 2007. Scale-related patterns in the spatial and environmental components of stream macroinvertebrate assemblage variation[J]. Global Ecology and Biogeography, 16: 149–159.
- Poff N L, Richter B D, Arthington A H, et al, 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology, 55, 147–170.
- Roy A H, Rosemond A D, Paul M J, et al, 2003. Stream macroinvertebrate response to catchment urbanisation (Georgia, U.S.A.)[J]. Freshwater Biology, 48: 329–346.
- Skoulikidis N T, Sabater S, Datry T, et al, 2017. Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: Status, pressures, and challenges for research and management[J]. Science of the Total Environment, 577(15): 1–18.
- Statzner B, Bêche L A, 2010. Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? [J]. Freshwater Biology, 55(suppl. 1), 80–119.
- Stubbington R, Chadd R, Cid N, et al, 2017. Biomonitoring of intermittent rivers and ephemeral streams in Europe: Current practice and priorities to enhance ecological status assessments[J]. Science of the Total Environment, 618: 1096–1113.
- Thompson R, Townsend C, 2006. A truce with neutral theory: local deterministic factors, species traits and dispersal limitation together determine patterns of diversity in stream invertebrates[J]. Journal of Applied Ecology, 47: 476–484.
- Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al, 2010. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 467: 555–561.
- Wagenhoff A, Townsend C R, Phillips N, et al, 2011. Subsidiy-stress and multiple-stressor effects along gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients in a regional set of streams and rivers[J]. Freshwater Biology, 56: 1916–1936.
- Zhang Y, Dudgeon D, Cheng D, et al, 2010. Impacts of land use and water quality on macroinvertebrate community in the Pearl River drainage basin, China[J]. Hydrobiologia, 652: 71–88.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

## Research Status and Perspectives of Stream Macroinvertebrate Based on Bibliometrics

WANG Xing-zhong<sup>1</sup>, TAN Xiang<sup>2</sup>, ZHENG Ying<sup>1</sup>

(1.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Aquatic Resources Conservation and Development, Huzhou University, Huzhou 313000, P.R.China;

2.Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, P.R.China)

**Abstract:** The macroinvertebrate community is a basic component of stream ecosystems and is often the target of biological monitoring and ecological research. In this study, we explored research hotspots, trends and developments in stream macroinvertebrate community research, identified the most frequently tested hypotheses and refined perspectives on this area of research. The aim of the study was to construct a knowledge map on macroinvertebrate research in streams to provide a basis and reference for future research. A total of 2 416 articles published in the Web of Science core collection database from 2009 to 2018 were analyzed using bibliometric analysis with CiteSpace software. Our findings included: (1) The number of published papers on macroinvertebrates in streams has grown over the past ten years, led by research in the United States; (2) The most popular research topics over the last 10 years have been related to land use and land cover, water quality and macroinvertebrate biodiversity; (3) Scientific hypotheses about the macroinvertebrate community in streams over last ten years were related primarily to the relationship between the macroinvertebrate community and environmental factors, especially factors related to water quality; biodiversity by means of comparative analysis; the effects of environmental pressures on macroinvertebrate community; the long-term response of the macroinvertebrate community to environmental change; the macroinvertebrate communities of intermittent rivers; biological traits of macroinvertebrate community.

**Key words:** macroinvertebrate; bibliometric analysis; research trends; knowledge map; research hotspots