



# 全球水华研究的科学知识图谱分析

胡激<sup>1,2</sup>, 马健荣<sup>1,2\*</sup>, 秦伯强<sup>3\*</sup>

1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

2. 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

\* 联系人, E-mail: [majianrong@cigit.ac.cn](mailto:majianrong@cigit.ac.cn); [qinbq@niglas.ac.cn](mailto:qinbq@niglas.ac.cn)

2023-01-18 收稿, 2023-03-12 修回, 2023-04-07 接受, 2023-05-24 网络版发表

国家自然科学基金(41621002, 42220104010, 41601537)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA23040303)和重庆市水利局项目(5000002021BF40001)资助

**摘要** 有害藻类水华是严重影响社会经济可持续发展的生态灾害, 频发于世界范围内的淡水和海洋水体. 通过检索水华相关的中英文期刊文献, 利用CiteSpace等软件进行科学知识图谱分析. 结果显示: (1) 目前发表的水华研究相关的中英文期刊论文达4.4万余篇, 根据年发文量大致可将全球水华研究划分为3个阶段: I (1942~1990年, <200篇/年)、II (1991~2014年, <2000篇/年)和III (2015年至今, >2000篇/年). (2) 水华研究的国际合作较为密切, 英文文献以美国发文量最多、中国第二. 中文的水华研究论文以中国科学院为中心形成协作网络, 水华研究的主要内容大致与国际上吻合. (3) 中国的水华研究在全球水华研究中占据重要地位. 在新兴前沿领域, 中文期刊所发表的研究内容稍滞后于英文期刊. (4) 关键词共现展示了水华研究的热点内容; 突现词揭示了3个研究阶段新兴前沿领域的变化; 关键词聚类则反映了全球水华研究的主要内容, 进而可以推测未来的发展趋势. 多尺度结合可能成为今后水华研究的一种趋势. 水华监测预警建模、遥感技术、大数据和人工智能分析等已成为重要的研究方法. 水华形成和消亡机制依然是核心科学问题. 水华全生命周期过程生态环境效应的定量化研究和人类活动与水华发生的互馈机制可能是今后的重要研究内容.

**关键词** 水华, 科学知识图谱, 浮游植物, 富营养化, 赤潮

藻类水华是水体富营养化的重要特征, 也是我国和世界其他国家所面临的一个重要水环境问题<sup>[1]</sup>. 世界上很多水体包括湖泊、水库、内海和海洋, 目前正在经历着严重的藻类水华(表S1), 甚至包括寒冷的南极和北极地区<sup>[2,3]</sup>. 藻华通过产毒素和恶臭物质、死亡分解时产生厌氧水团和破坏正常的食物网, 对水质和生态系统有巨大的负面影响, 会造成经济损失和社会问题<sup>[4]</sup>. 20世纪80年代以来, 全球范围内记录过有藻类水华现象的湖泊占68%左右<sup>[5]</sup>. 2007年, 江苏“无锡水危机事件”, 太湖蓝藻水华进入自来水厂取水口, 造成无锡

市500多万市民的用水受到影响<sup>[6]</sup>. 2014年, 美国伊利湖蓝藻水华造成当地50余万人的用水问题<sup>[7]</sup>. 世界上很多重要水体都发生过蓝藻水华, 仅在美国和中国, 淡水水华因影响饮用水供应、渔业水产、娱乐和旅游业而造成每年超过111亿美元的损失<sup>[8]</sup>. 因此, 蓝藻水华的控制成为世界性难题.

富营养化水体中的藻类水华, 以蓝藻水华最为常见且危害最大, 上述两次水危机事件均是蓝藻(微囊藻)水华引起的. 而揭示水华发生机理是进行防治的基础和关键. 受气象、水文、水质和藻类生长、迁移等因

引用格式: 胡激, 马健荣, 秦伯强. 全球水华研究的科学知识图谱分析. 科学通报, 2023, 68: 3196–3210

Hu W, Ma J R, Qin B Q. Analysis on scientific knowledge graph of global algal bloom studies (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 3196–3210, doi: 10.1360/TB-2023-0062

素的影响,藻类水华的形成过程极其复杂,有些水华形成甚至有“来无影,去无踪”的特点。长期以来,人们对其形成机理缺乏了解,难以精确模拟和预测(目前一般数值模型最高只能预测到60%~70%,在常年发生且有长期研究数据的水体如太湖也只能达到80%左右),因此很难实现有效防治其发生。法国40位学者历时两年研究和总结出富营养化问题是“旧瓶装新酒?”(Eutrophication: A new wine in an old bottle?)的探讨<sup>[9]</sup>,形象地描述了以藻类水华为典型特征的富营养化问题在全球变化和人类活动加剧的背景下,在最近几十年成为悬而未决的世界难题。改革开放以来,特别是2007年“无锡水危机事件”以来,我国投入大量经费进行藻类水华形成机理和富营养化控制方面的研究,取得了一系列重要进展。截至目前,很多理论或假说尽管已经在蓝藻水华的防治实践中产生重要作用,但仍然未能清楚地阐释蓝藻水华发生的客观规律和开发出高精度的藻类水华预测模型。为了深入了解该领域的研究进展,预测未来研究的动态和推动水华相关研究,本文对全球水华进行了文献计量分析。

## 1 研究方法

本研究利用CiteSpace文献计量软件,针对国内外藻类水华的已有研究文献进行分析。为确保所收集文献的科学性和准确性,本研究利用Web of Science数据库(以下简称为WOS数据库)和CNKI数据库分别对有关水华的英文和中文文献进行检索。前者检索规则为“TS=(phytoplankton blooms) OR TS=(algal blooms) OR TS=(red tide)”,文献类型限定“article OR review article”,后者检索规则为“主题OR题名=水华+藻类水华+赤潮”,文献类型限定为“学术期刊”,二者均不对检索时间和文献来源进行限制(研究方法详见补充材料)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发文量统计与研究发展脉络

经检索,涉及36141篇英文文献和8501篇中文文献,其中绝大部分为环境科学领域的应用研究。英文文献中最早涉及藻类水华的文章是1942年Wheeler等人<sup>[10]</sup>发表于*Public Health Report*上有关藻类毒性的研究。引用频次最高的文献为美国科学院院士Carpenter等人<sup>[11]</sup>对水生生态系统中有关氮磷过度富集问题展开的研究。而中文文献检索到的最早文章为1978年王武<sup>[12]</sup>对鱼池

内兰绿裸甲藻水华的初步探索研究。被引频次最高的为2005年孔繁翔和高光<sup>[13]</sup>发表于《生态学报》的论文。该文提出了水华形成的“四阶段”假说,其不仅对水华形成的环境因素进行了探讨,而且对蓝藻的生长和生理特征等方面展开了论述,对于开展藻类水华形成机制的研究具有极为重要的意义。

全球水华研究中被引频次(所有数据库)前十的参考文献如表S2所示。在这些高被引文章中,大部分的研究聚焦于富营养化问题,其中发表于*Nature*、*Science*的文章为4篇。其中,引用频次最高的为Schindler<sup>[14]</sup>的文章,同时也是4篇中发表时间最早的一篇。该文章从养分限制的角度揭示了磷限制对治理湖泊藻类水华的影响,在藻类水华防控治理方面的研究中扮演着极其重要的角色。而高水平期刊的关注点呈现明显的趋向于宏观大尺度、多样本和微观的机制性研究,且高水平期刊的发文量与总发文量间存在明显的相关关系(图S1,详细内容见补充材料)。

在所选用的检索库中,藻类水华研究的中文期刊论文被引频次低于英文期刊,仅有一篇参考文献的被引频次超过千次。在被引频次前十的中文文献(表S3)中,研究对象大多聚焦于太湖流域的水华现象,研究机构主要为中国科学院南京地理与湖泊研究所,发文量最高(3篇)的学者为秦伯强研究员。与英文期刊存在相通的是,这些文献的研究同样聚焦于富营养化湖泊,重点关注富营养化湖泊中水华现象发生的原因机制。由此可以看出,自开展藻类水华的研究以来,我国的研究者在探讨其成因机制方面展开了众多研究,且此方面的研究越趋成熟。此外,由于人类活动过于频繁,近年赤潮爆发的规模加大、持续时间变长,同时致灾效应加重<sup>[15]</sup>,我国近海水华(赤潮)的研究表现也不俗。2篇我国赤潮的综述性论文进入被引频次前十的中文文献(表S3),邹景忠等人<sup>[16]</sup>关于渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨,排第二;周名江等人<sup>[17]</sup>对中国赤潮的发生趋势和研究进展进行的综述,排第四。陈楠生等人根据历年的航次调查结果对渤海<sup>[18]</sup>、长江口<sup>[19]</sup>等海域的赤潮及赤潮物种的组成进行了数据统计和剖析解读,为探索中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究提供了有利帮助。赤潮与其环境因子的关系研究在近海水华的研究领域中占据重要地位,特别是对长江口、大亚湾等人类活动强度较高入海口的研究。

文献的年出版数量可以直接反映该领域的研究活动状况。全球水华研究的历年发文量如图1所示。根据

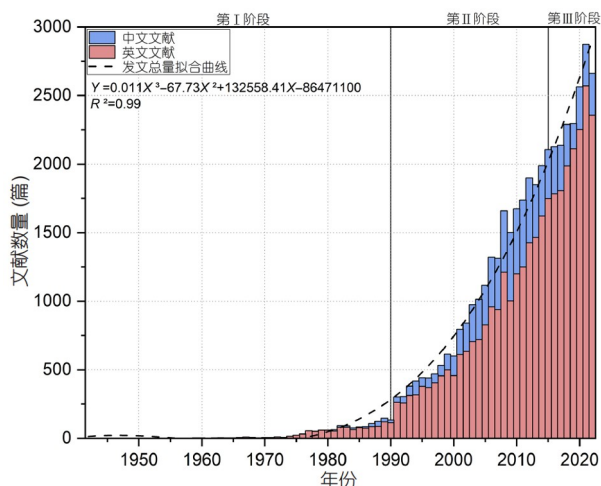


图1 基于WOS和CNKI数据库的水华研究的历年发文量  
Figure 1 The number of articles on algal bloom research according to WOS and CNKI database

年产文章数量对全球水华研究进行阶段划分：1942~1990年，年发文量均在200篇以下，为水华研究的第一阶段；1991~2014年，年发文量均在200篇以上2000

篇以下，为水华研究的第一阶段；2015年至今，有关水华研究的发文量均在2000篇以上，因此将其定义为水华研究发展的第三阶段。根据水华发展的三阶段以及各阶段内的水华研究成果，图2已将全球水华研究发展脉络图展出，图中节点包括该阶段内的部分重要研究成果。

第I阶段为1942~1990年，是全球水华研究的萌芽期。在这期间文献年出版量仅达到历年总发文量的3.12%。特别是在1975年以前，英文期刊的年发文量未超过20篇，中文文献甚至处于零篇状态。这一阶段发表的英文文献共1223篇，共被引频次84934次，篇均被引频次48.4次。同时这些文献在近年均有较高的被引频次，由此可见，这些文献奠定了水华研究领域的坚实基础。其中被引频次最高的为Schindler<sup>[14]</sup>于1977年发表在*Science*的文章“Evolution of phosphorus limitation in lakes”。而该阶段的研究主要针对藻类水华开展宏观上的初步探索分析，特别是氮磷营养盐与藻类水华的关系。Paerl<sup>[38]</sup>对海岸、河口和内陆水域的浮游植物展开了研究。结果表明，海岸的甲藻水华、河口的甲藻和蓝

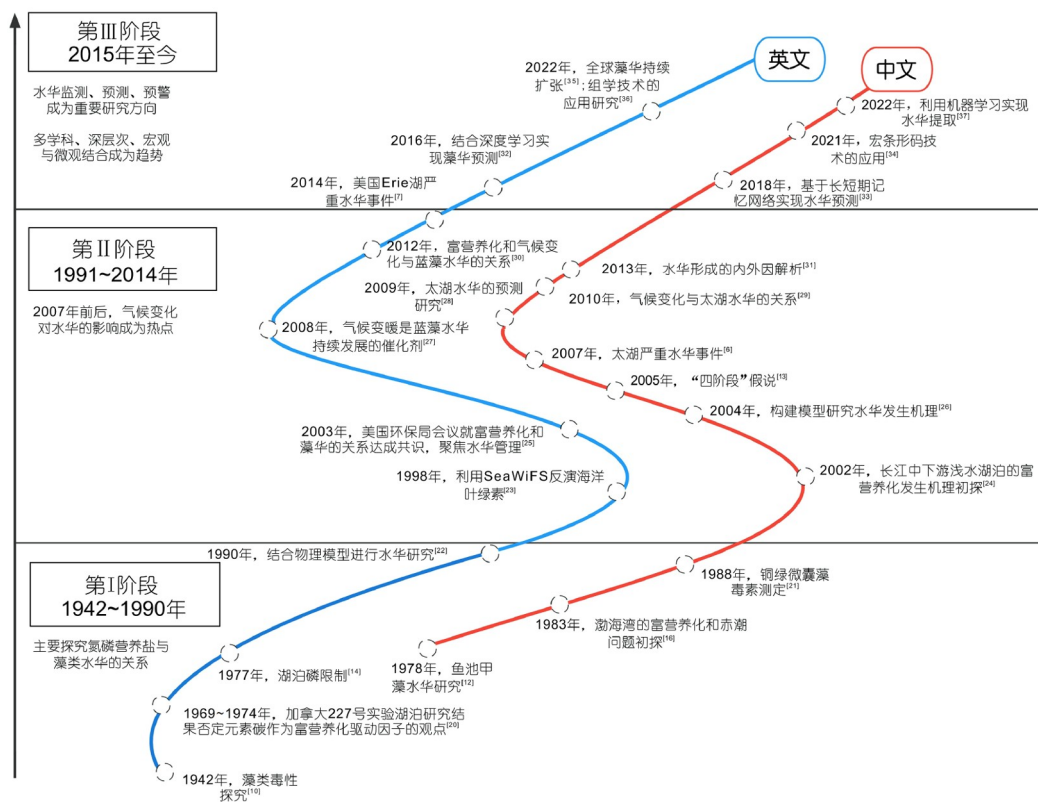


图2 水华研究的发展脉络图  
Figure 2 The development context of algal bloom research



藻水华以及淡水湖泊的蓝藻水华,在水质差异明显、垂直分层显著、气候温暖、高入射光合有效辐射、高外来有机物负荷(溶解有机碳和颗粒有机碳)和无机物负荷(氮和/或磷)等情况下发生的几率更高。该研究对综合探讨水华的暴发机制具有重要意义。且加拿大的227号实验湖泊研究成果确定了磷和氮是湖泊富营养化蓝藻水华的主要驱动因子,否定了以往将元素碳作为富营养化驱动因子的观点<sup>[20]</sup>。同时较多的研究聚焦于藻类水华的毒性介绍或其毒性的影响。大部分的研究区域聚焦于内陆水域,也有学者对冰缘、海洋、海岸等水域发生的藻类水华事件开展研究。但仅有极少数的学者结合物理模型对水华开展研究。如Fasham等人<sup>[22]</sup>利用海洋混合层浮游生物动力学模型对春季水华发生原因进行了探讨,结果表明,冬季浮游动物种群的减少和春季太阳辐照度的增加共同导致了春季水华的暴发。这一阶段发表的首篇中文文献在1978年,而在1978~1990年的10余年内出刊量仅为168篇,说明国内的中文的水华论文起步较晚。且由于起步较晚,对水华的研究主要为藻类水华及其毒性的介绍性文章以及对池塘、湖泊水华进行的初步探索。何家苑等人<sup>[21]</sup>从病理学角度对蓝藻水华的毒性进行了介绍;邹景忠等人<sup>[16]</sup>对渤海湾的富营养化和赤潮问题进行了初探。此类研究主题大多与英文水华论文研究方向类似,但在此阶段,中文的水华论文并未涉及物理模型的结合或长时序的研究。

第Ⅱ阶段为1991~2014年,该阶段的发文量呈大幅增长趋势,年发文量均在200篇以上,特别是2007年后,年发文量均超出1500篇。该阶段有关水华研究文章的出版总量为24181篇,其中英文文献18283篇,中文文献5898篇。文献的年出版量达到历年总发文量的54.19%,占总发文量的一半以上。英文文献共被引958940次,篇均被引40.57次,篇均被引与上一阶段相比稍有下降,但水华研究被引频次前十的中英文文献中均有9篇发表于该时期(表S2、S3)。可以看出,该时期是全球水华研究极为重要的发展阶段,且研究质量有较为明显的提升,为全球水华研究的转型发展提供了有利条件。由于在过去的几十年中,水华现象的暴发在频率、强度和地理分布方面对公共卫生和经济等方面的影响有所增加,该时期全球水华研究经上一阶段的初步认知和发展已经进入一个新探索阶段。大部分的研究开始聚焦于水华问题的管理以及降低有害藻华对生态、经济以及人类健康等造成的不利影响。van den Bergh等人<sup>[39]</sup>

针对海洋生态系统中的有害藻华现象,从生物-经济-法律的角度提出了综合的监管防治见解。2003年1月,美国环境保护局发起了一次圆桌会议,就富营养化和有害藻华之间的关系达成共识,特别是那些对管理行动可能适用的关系<sup>[25]</sup>。有关气候变化与水华的研究在2007年前后成为一个爆破性的热点。Edwards和Richardson<sup>[40]</sup>探究了气候变化对海洋生物群落的影响和营养失衡的问题。Paerl和Huisman<sup>[27,41]</sup>研究表明,气候变暖是蓝藻水华持续发展的催化剂,较高的气温不仅会更适宜于蓝藻的生存,而且会加强湖泊的垂直分层、减少垂直混合,同时还会通过影响分层开始和消退的时期,从而延长蓝藻的最佳生长期。O'Neil等人<sup>[30]</sup>均围绕气候变化与藻类水华展开了一系列研究。由此可见,在此阶段后期和下一发展阶段,气候变化和水华的交互关系可能成为重要的研究主题。高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定水中的微囊藻毒素也成为该阶段的重要研究内容。这一时期的中文的水华论文相较于上一阶段也得到了很大程度的发展,检索的中文文献中69.38%均发表于该时期。该阶段的研究同样聚焦于太湖、汉江、三峡库区等主要水华高发区,且探究湖泊富营养化发生机制的文章较多<sup>[31,24]</sup>。但与第Ⅰ阶段拘泥于初步认知不同的是,该阶段开始出现长时序、多空间的探索研究。马荣华等人<sup>[26]</sup>利用卫星遥感对1979~2007年太湖蓝藻水华的时空分布规律展开了研究。另一方面,国内学术界开始聚焦于模型的构建,如利用模拟实验并构建模型对藻类水华的发生机理进行分析研究<sup>[42]</sup>。可以看出,国内学术界对藻类水华的研究开始往深层次方向发展,且响应了国际研究,中国科学家在此阶段也开始研究气候变化对藻类水华的影响,特别是温度与物候的影响<sup>[29]</sup>。由于太湖2007年暴发了严重的水华事件,因而此事件之后国内水华研究的关注度倍增,尤其是对太湖蓝藻水华的研究,形成了以中国科学院南京地理与湖泊研究所为中心的研究机构协作网络。总体来看,1991~2014年间全球水华研究得到快速发展,相较于第Ⅰ阶段,第Ⅱ阶段属于一个更宽领域、更深层次的发展阶段。在此阶段内,中国和美国均暴发了严重的水华事件,这无疑引起了学者的广泛关注,同时也推动了中美水华研究的发展。同时遥感监测、环境效应等研究方向在该阶段开始初露矛头,且得到一定发展<sup>[23,28]</sup>,下一阶段会成为重要的研究热点。

2015年至今,水华研究的年发文总量超过2000篇,

是水华研究发展的第Ⅲ阶段. 从发文总量来看, 此阶段共发表文献19050篇, 占现存总量的42.69%, 其中英文文献16616篇, 中文文献2434篇. 英文文献共被引242168次, 篇均被引14.44次. 共被引频次、篇均被引频次与前两阶段相比均有下降的趋势, 为文献较新所导致. 在研究内容方面, 已有研究均表明, 富营养化、全球气候变暖和二氧化碳浓度增加均会造成蓝藻水华强度、频率和持续时间的增加<sup>[7]</sup>. 而藻类水华事件在近年来频发, 且有持续扩张之势<sup>[35]</sup>, 同时科学技术不断向前发展, 因此该阶段有关水华生消、动态扩张的相关研究, 在过去研究的基础上被赋予了全新的内容. 如在水华监测和预测方面, 学者利用卫星遥感数据与人工智能技术相结合的方法对水域中的藻类水华进行识别、监测和预测. Zhang等人<sup>[32]</sup>基于深度学习(deep-learning)的方法构建了一个5层模型, 对浮游植物细胞密度与各类环境因子间的关系进行了提取, 从而实现水华预测. Park等人<sup>[43]</sup>基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)对饮用水供应系统中的藻类进行了识别. 此类与人工智能技术相结合的研究在近几年成为学术界的热点话题. 遥感技术具有快速捕捉地面信息、监测范围广、监测成本较低等优点<sup>[44]</sup>, 相对于传统的水华监测手段具有明显优势. 而人工智能技术可以利用其自动化监测系统, 使实现高效、准确的藻类水华识别、监测成为可能<sup>[45]</sup>, 因而通过遥感和人工智能相结合的方法来研究水华无疑将成为未来研究的重要突破口. 在水华的环境效应方面, 研究内容大量聚焦于以生态系统服务为核心, 探究系统内各组成要素与藻类水华现象的相互作用, 即藻类水华现象暴发的生境原因以及生态影响, 以实现藻类的可持续管理. 利用分子生物学等技术进行水华藻类的生理、生态和毒理分析在该阶段逐渐兴起. Xu等人<sup>[36]</sup>综合利用宏基因组学和宏转录组学对我国北部湾水华暴发期间的微生物响应进行研究, 结果表明, 细菌群落在水华暴发期和衰退期差异显著. 水华与气候变化相结合的研究在该时期得到重点关注, 同时有关海洋藻类水华(赤潮)的相关研究也是这一阶段的重要主题. 而国内的中文水华论文在此阶段也达到了发展高峰. 大多数研究主题能与国际前沿内容相契合, 如藻类水华对全球气候变化的响应<sup>[46]</sup>、遥感技术的应用<sup>[37]</sup>、水华的预测和预警<sup>[33]</sup>、水华与生态系统的相互作用<sup>[47]</sup>等. 除此之外, 国内对水华防控的关注度较高. 如利用植物释放的感化物质控制有害藻类水华、利用芽孢杆菌治理赤潮、对

氮磷营养盐进行控制等. 但利用组学技术研究水华藻类的中文文献并不多, 基本只有综述性文章<sup>[34,48]</sup>. 综上所述, 全球水华研究发展至今, 其研究内容已朝向多学科融合、深层次探索、宏观与微观相结合的方向转型发展.

## 2.2 期刊与作者发文量

为对全球水华研究作出更深层次的探索研究, 根据CiteSpace数据源限定规则, 本文分别对WOS核心数据库所有文献来源中检索得到的29092篇英文文献和CNKI数据库的SCI来源、EI来源、CSSCI来源、CSCD来源、北大核心来源中检索到的5075篇中文期刊论文结合文献计量软件CiteSpace开展定性和定量分析. 经初步定量分析可知, 这些文献中大部分文献来源于海洋淡水生物学领域与环境科学领域, 发文量(出版量)最高的作者分别为Paerl和吕颂辉, 其中Paerl发文量为153篇(英文)、吕颂辉发文量为77篇(中文). 英文文献和中文文献发文量前十的作者信息在表S4中列出, 可以初步看出, 美国的研究者在国际水华研究领域作出了突出贡献, 而中国科学院在国内水华研究领域作出的贡献占有很大比例. 从期刊发文量统计结果(表1)可以看出, *Harmful Algae*和《湖泊科学》分别成为英文、中文有关水华研究发文量最多的期刊.

## 2.3 期刊共被引与国家合作

将检索的核心库文献导入CiteSpace文献计量软件中, 通过软件自带去重功能得到英文文献28819篇、中文文献5062篇, 再进行期刊共被引分析、发文国家合作网络分析、关键词共现分析以及关键词突现分析等.

由于目前CiteSpace软件仅支持英文文献共被引分析, 因而本研究首先对WOS核心库检索的期刊建立共被引网络, 结果如表2和图3(a)所示. 由于数据量较大, 共被引频次不便作为节点展示, 因此图中所展示的期刊为中介中心性高的期刊. 中介中心性一般用来指最短路径中介中心性, 是用于衡量各节点在整个知识图谱网络中的重要指标之一, 节点的中心性越高, 则代表该节点在图谱中越重要, 且中介中心性大于0.1则可认为该节点在整个网络结构中起到连接其他节点的桥梁作用<sup>[49]</sup>. 通过期刊共被引频次和中介中心性结果可知, *Limnology and Oceanography*和*Harmful Algae*在水华研究的英文文献领域占据了举足轻重的地位. 其中高被引论文36篇, 综述性论文76篇. 如2012年, O'Neil等

表 1 中英文文献水华研究发文章量前十的期刊

Table 1 The top 10 journals in English and Chinese articles by volume of algal bloom research

| 序号 | 英文文献                                                       |         | 中文文献    |         |
|----|------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|    | 期刊名称                                                       | 发文章量(篇) | 期刊名称    | 发文章量(篇) |
| 1  | Harmful Algae                                              | 1210    | 湖泊科学    | 330     |
| 2  | Marine Ecology Progress Series                             | 1026    | 海洋环境科学  | 320     |
| 3  | Limnology and Oceanography                                 | 681     | 环境科学    | 198     |
| 4  | Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography | 673     | 海洋与湖沼   | 171     |
| 5  | Hydrobiologia                                              | 620     | 水生生物学报  | 168     |
| 6  | Journal of Plankton Research                               | 567     | 海洋科学    | 146     |
| 7  | Science of the Total Environment                           | 540     | 生态学报    | 136     |
| 8  | Estuarine Coastal and Shelf Science                        | 532     | 中国环境科学  | 136     |
| 9  | Journal of Geophysical Research: Ocean                     | 507     | 水生生态学报  | 131     |
| 10 | Frontiers in Marine Science                                | 448     | 环境科学与技术 | 127     |

表 2 英文文献中水华研究领域被引频次及中介中心性前十的期刊

Table 2 The top 10 journals by citation frequency and betweenness centrality of algal bloom studies in the English articles

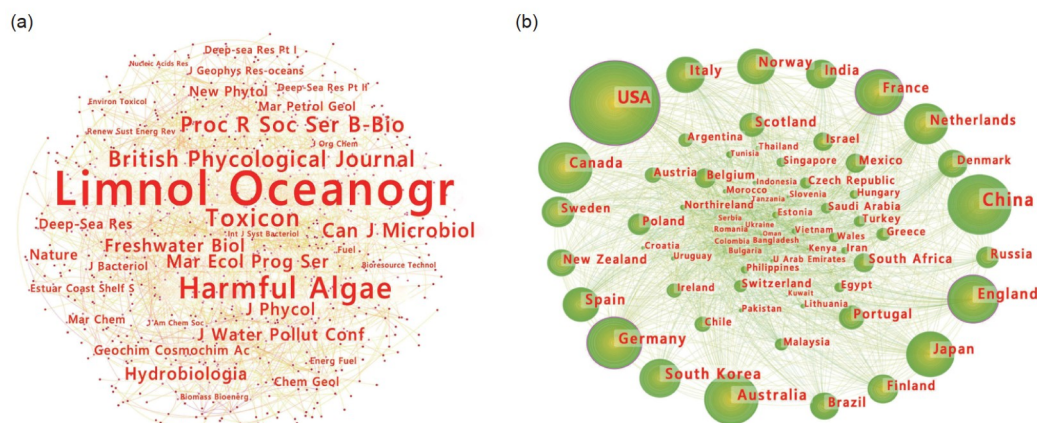
| 序号 | 被引频次                           | 中介中心性                                                  |
|----|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1  | Limnology and Oceanography     | Limnology and Oceanography                             |
| 2  | Harmful Algae                  | Harmful Algae                                          |
| 3  | Marine Ecology Progress Series | Toxicon                                                |
| 4  | Hydrobiologia                  | Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences |
| 5  | Science                        | Canadian Journal of Microbiology                       |
| 6  | Journal of Phycology           | British Phycological Journal                           |
| 7  | Nature                         | Marine Ecology Progress Series                         |
| 8  | Journal of Plankton Research   | Hydrobiologia                                          |
| 9  | Water Research                 | Journal of Phycology                                   |
| 10 | Marine Biology                 | Freshwater Biology                                     |

人<sup>[30]</sup>在*Harmful Algae*发表的有关富营养化与气候变化对藻华生长的文章被引频次达1304次; 2008年, Heisler等人<sup>[25]</sup>发表在*Harmful Algae*的一篇综述性文章, 对2003年美国环境保护局发起的有关“富营养化与有害藻华之间的关系”的圆桌会议所达成的7项共识作了充分阐述, 列举出每项共识的支持证据和相关实例, 为今后的藻华研究提供了更为明确的思路. Volponi等人<sup>[50]</sup>对北美东北部的25个湖泊进行了原位微体孵化, 探究湖泊中溶解有机氮(dissolve organic nitrogen, DON)、溶解无机氮(dissolve inorganic nitrogen, DIN)以及总磷(total phosphorus, TP)对浮游植物生物量的影响. 结果表明, 在近一半的研究湖泊中, 限制类型会随氮形态的

变化而发生变化, 而DON对浮游植物群落的生物累积量表现出更大的反应. 此项研究对预测淡水生态系统中浮游植物生产力和营养限制动态的研究具有一定的启发作用. 而该网络图的节点和连线较为密集, 说明各期刊间联系密切.

根据WOS核心库检索结果可知, 水华研究领域的人员来自于全球160个国家和地区. 其中美国发文章量位居榜首, 占比29.99%; 中国发文章量排名第二, 占比24.99%; 第三为加拿大, 占比6.31%. 其后分别为德国、澳大利亚、英国、法国、韩国、日本、西班牙等. 可以看出, 水华研究主要集中在北美、东亚以及欧洲地区, 究其原因可能与国家综合国力、自然地理状况以





**Figure 3** Cited journal network diagram (a) and national cooperation map (b) by WOS core collection

及面临的水体富营养化问题休戚相关。从英文文献发  
文量可以看出,水华研究主要集中于中国和美国,两者  
总发文量超出总检索文献数量的一半以上。美国发文  
量自1990年开始呈现波动上升的趋势,进入21世纪后,  
更是呈现快速发展之势。特别是在2014年Lake Erie水  
华事件之后,其发文量迅速上升,2014~2022年发文量  
占总发文量的48%以上。中国的水华研究虽起步较晚,  
但其发展速度快,特别是在2007年太湖暴发严重水华  
事件之后,水华研究关注度呈明显上升趋势。国家及地  
区间合作网络关系图谱如图3(b)所示,节点的大小代  
表发文量的多少,节点间的连线代表国家间的合作网  
络。国家间的密切合作是推动水华研究向前发展的重  
要因素。从合作网络图谱可以看出,在水华研究领域,  
各个国家和地区间联系合作密切。由此可以看出,全球  
水华研究的发展离不开世界各国与各地区间的交流合  
作,今后的发展依旧需维持稳定的国家与国家、国家与  
地区、地区与地区间的合作,促进共同发展进步。

## 2.4 研究热点分析

### 2.4.1 关键词共现分析

关键词的共现分析是用于展示关键词之间网络关系的一种分析方法，其共现强度和共现网络关系是揭示该分析领域内研究前沿、热点的重要依据。本研究利用上述检索文献分别将国内外学术界出现频率较高的关键词展示出来(图S2、S3)。图中圆圈大小表示出现频率的多少，而拥有紫色外圈的节点则代表具有高中介中心性，若其中心性大于0.1则可视作关键节点，对该研究的领域极为重要。表3已将水华研究领域出现频

次和中介中心性前十的中、英文关键词分别提取出来。

从图S2可以看出, 对于英文文献的水华研究, 其研究方向趋于多样化, 出现频数前十的关键词为harmful algal bloom、bloom、phytoplankton、growth、water、eutrophication、dynamics、nitrogen、microcystis aeruginosa、climate change; 中介中心性前十的关键词为diversity、chromatography、heterosigma akashiwo、marine sediment、mass spectrometry、brown tide、anatoxin a、anabaena flos aquae、coccolithophore、chlorophyll a. 由出现频次和中介中心性的结果可以看出, 对于英文文献的水华研究, 由于其涉及范围广, 研究热度较高的区域在全球各地分布, 如中国的太湖、黄海, 美国的Erie湖、Utah湖以及各个海湾, 日本的Biwa湖, 德国的Constance湖等. 尤其是中国太湖流域的水华现象, 已经得到国际和国内学者的广泛关注. 研究主题包括从水华动态的时序研究到水华生消机制机理的研究、从水华造成的损失到水华的控制防治、从物理模型构建到生物化学机制控制. 而对于中文文献的藻类水华研究方向, 从图S3可以看出, 研究区域主要聚焦于太湖、三峡水库、巢湖、滇池4个内陆水域和东海海域. 尤其是太湖流域, 不论是在典型的氮磷营养盐分析, 还是新兴的遥感动态监测、时空分布等方面, 其研究趋于成熟. 在众多高频关键词中, “赤潮”这一关键词不仅出现频次最高, 而且拥有较高的中介中心性, 可以说明国内学者对赤潮的研究在中文水华研究领域占有绝对的重要地位. 而从研究方向来看, 温度、环境因子、水质、叶绿素a、营养盐、群落结构等关键词均表现出较高的出现频次, 表明水华暴发的机制机理研究是中

表 3 中英文文献中前十的高频关键词及高中介中心性关键词

Table 3 The top 10 keywords with high-frequency and high-betweenness centrality in English and Chinese articles, respectively

| 序号 | 英文文献                   |                      | 中文文献 |       |
|----|------------------------|----------------------|------|-------|
|    | 出现频次                   | 中介中心性                | 出现频次 | 中介中心性 |
| 1  | Harmful algal bloom    | Diversity            | 赤潮   | 夜光藻   |
| 2  | Bloom                  | Chromatography       | 蓝藻水华 | 浮游生物  |
| 3  | Phytoplankton          | Heterosigma akashiwo | 富营养化 | 斜生栅藻  |
| 4  | Growth                 | Marine sediment      | 水华   | 生态环境  |
| 5  | Water                  | Mass spectrometry    | 浮游植物 | 对策    |
| 6  | Eutrophication         | Brown tide           | 太湖   | 生长    |
| 7  | Dynamics               | Anatoxin a           | 营养盐  | 伪鱼腥藻  |
| 8  | Nitrogen               | Anabaena flos aquae  | 环境因子 | 赤潮    |
| 9  | Microcystis aeruginosa | Coccolithophore      | 三峡水库 | 环境因子  |
| 10 | Climate change         | Chlorophyll a        | 微囊藻  | 浮游植物  |

文的水华研究论文的重要板块。目前,学术界将水华的治理大致分为生物法、物理法和化学法3种。而生物法作为一种经济友好型方法,近年来备受国内外学者的关注。从化感作用、溶藻细菌等高频关键词可以看出,有关利用生物学方法治理水华的研究也是国内水华研究的重要分支。如绿藻栅藻FACHB-1229对微囊藻FACHB-3550和FACHB-905的抑制率可以达到53.95%和48.39%<sup>[51]</sup>;利用生物絮凝技术直接降低水体中藻类细菌和真菌的生物量<sup>[52]</sup>等。同时有关水华的时空分布也是中文文献领域的重点关注方向。李加龙等人<sup>[53]</sup>基于MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)数据对滇池蓝藻水华暴发的时空状况进行了反演分析,并利用随机森林等方法模型对其影响因子进行了测度。因而可以看出,无论是赤潮的时空分布,还是淡水水域藻华的时空分布,其研究主题大多为对其分布特征进行描述分析,同时与环境影响因子相结合,探讨其环境机理。此种类型的研究大多涵盖多领域的学科知识,同时涉及与生态系统的耦合机制,因而必将成为众多学者的重点关注对象。

#### 2.4.2 关键词突现分析

相对于高频关键词, CiteSpace的突现词可能更适合作为新兴前沿领域的探测器<sup>[54]</sup>。通过关键词突破检验可以清楚地掌握在不同阶段极大可能性成为该阶段研究重点的关键词及其突现强度和突现历史,表明学术界对该研究关键词的关注度,以此强化对该领域研究前沿重点的把握。CiteSpace所生成的突现表(表S5、S6)中红色部分代表在此阶段内研究人员对该词的研

究兴趣急剧上升,蓝色部分则表示该时段内研究人员对该词的关注度较低,突现强度与研究热点的影响力成正比。关键词突现分析结果如表S5、S6所示。从研究阶段来看,在水华研究的第Ⅰ阶段, spring bloom、bacteria、zooplankton、marine phytoplankton、abundance成为该阶段国际水华研究的新兴前沿热点关键词,其中marine phytoplankton突现强度最高,为68.36,说明在此阶段海洋水华的研究可能是当时研究热度最高的新兴研究领域。海洋水华一般以甲藻水华为主<sup>[38]</sup>,适宜的海水温度、一定的叶绿素含量、稳定的洋流环境等都是海洋水华暴发的有利因素,而铁含量的增加会对海洋水华的暴发起到促进作用。在水华研究的第Ⅱ阶段, blue green algae、limitation、baltic sea、chesapeake bay、food web、toxin、heterosigma akashiwo、macro-algal bloom、aureococcus anophagefferen、karenia brevi、harmful algae和赤潮、赤潮生物、夜光藻、大鹏湾、预报、毒性、珠江口、有害赤潮、汉江、大亚湾、胶州湾、东海、淀山湖、景观水体、海州湾等分别成为英、中文水华研究领域的新兴热点关键词,其中“blue green algae”和“赤潮”的强度最高,分别为94.85和74.75。这说明在水华研究发展的第Ⅱ阶段,英文文献的新兴前沿热点领域大多集中于蓝绿藻水华,研究区域开始转向内陆河流、湖泊、水库、湿地等水域的水华现象,而中文文献的新兴前沿领域集中于海洋水华(赤潮)的研究。随着内陆水体中水华暴发频率和严重程度的显著增加,为控制其扩张,降低水华现象造成的生态、经济、健康损失,确定导致水华现象的相



关因素、精准预测和制定相关防治政策越来越成为该时期学者的重点关注内容。我国近海有害赤潮在此阶段频发,其暴发规模和严重程度均呈急剧扩大趋势,赤潮的动态变化过程、以多学科交叉的角度研究赤潮的发生机制并提出相应的预测和防治方法成为国内水华研究的热点。China、lake Taihu、management、oxidative stress、climate change、cyanobacteria bloom、phytoplankton community、mechanism和蓝藻水华、环境因子、巢湖、太湖分别是第Ⅲ阶段水华研究的新兴前沿热点关键词,其中“oxidative stress”和“蓝藻水华”的突现强度最高,分别为50.09和21.71。这说明目前英文文献中水华研究的新兴前沿领域可能集中在利用过氧化氢等进行水华化学治理的方面,而中文研究的新兴前沿领域可能集中在蓝藻水华的研究。在水华的化学防治措施方面,研究表明, $H_2O_2$ 对蓝藻水华有选择性抑制作用<sup>[55]</sup>,减少微囊藻毒素的合成,从而控制藻类水华的现象。自太湖2007年严重水华事件之后,蓝藻水华一直是国内学术界的研究重点,其发生机理、影响因素、防控对策、时空分布等均是该时期的研究热点。英文文献排名前十的突现词分别为blue green algae、marine phytoplankton、zooplankton、spring bloom、karenia brevis、baltic sea、oxidative stress、harmful algae、limitation、north sea; 中文文献排名前十的突现词分别为赤潮、蓝藻水华、赤潮生物、夜光藻、大鹏湾、淀山湖、巢湖、珠江口、时空分布、环境因子,其结果基本与上述共现分析结果相吻合。

## 2.5 研究趋势分析

CiteSpace关键词聚类是指软件通过相关算法将关系紧密联系的关键词联系起来,汇聚成一个形状不规则的区域,其聚类排序数越小,表明该聚类中所包含的关键词数量越多。根据CiteSpace关键词聚类结果(图S4、S5)可知,国际上的水华研究系统已将检索到的关键词聚成36个聚类领域,其中algal bloom、south ocean、nutrient limitation、lake Taihu、red tide、domoic acid、water bloom、prymnesium parvum、water quality、oxidative stress为排名前十的聚类领域。其Modularity聚类模块值 $Q$ 为0.9146, Silhouette聚类平均轮廓值 $S$ 为0.9672,可见该聚类结果是显著且令人信服的(一般认为, $Q>0.3$ 表示聚类结果显著, $S>0.7$ 表示聚类结果具有强信服度)。对于国内水华研究领域,系统已将检索文献的关键词自动划分成23个聚类领域,其中

海洋危害、浮游植物、巢湖、溶藻细菌、感化作用、硅藻、微囊藻、长江口、危害、绿藻为排名前十的聚类领域。该聚类结果的 $Q$ 值为0.8724,  $S$ 值为0.9543,可见该结果同样也令人信服。

富营养化问题和水华现象未得到根本缓解是全球水域水环境面临的重要生态环境问题,但通过几十年的发展,全球水华研究也取得了一系列重要的研究成果。根据聚类分析结果,全球水华研究进展和趋势可以从藻类水华的生物学和生态学研究、毒性研究、监测与治理研究以及中国水域的水华研究四方面进行分析总结。

### 2.5.1 藻类水华的生物学和生态学研究

近年来,水华的生物学和生态学研究在宏观上表现为对浮游植物群落结构特征、演替规律以及水华生消环境机制的研究。Reynolds等人<sup>[56]</sup>利用功能群分类法对浮游植物群落进行分类的方法,打破了传统分类方法忽略生态属性和生境特征的缺点,被广泛应用于藻类生态学研究中。快速变化的生境可能对浮游植物的群落结构和功能产生深远影响。Liu等人<sup>[57]</sup>利用水动力生态学建模方法,探讨了包括营养物质、光照在内的环境条件对浮游植物群落演替的作用和协同效应,并指出保持良好湖泊生态状况的营养物和总悬浮固体含量的阈值。而水华的生消过程在不同阶段对微生物的群落结构和优势种的影响各不相同,因而浮游植物的群落结构也可作为预测藻华阶段的判别指标之一。氮磷营养盐、气温、水力滞留时间等环境因子均对水华的暴发、持续和消亡阶段产生不同响应。微观上则表现为利用现代分子生物学等技术进行水华藻类生理、生态和毒理分析以及水华藻类在生态系统物质循环中的作用和微生物(细菌、病毒等)的相互作用。Shoguchi等人<sup>[58]</sup>利用基因组学的方法对甲藻核基因组进行组装,结果展示了甲藻基因组相较于其他真核生物的独特特征,深化了对真核生物群的认识。Gobler等人<sup>[59]</sup>通过生态基因组的方法发现,抑食金球藻参与光捕获、有机碳和氮使用的基因较其他6种竞争性浮游植物更多,从而使浊度、有机物和金属浓度高的沿海生态系统成为适宜抑食金球藻生长的生态位。Brown等人<sup>[60]</sup>利用代谢组学技术对亚历山大藻的不同物种进行对照研究,以此突出亚历山大藻的代谢变异与毒性的关系。Zhou等人<sup>[61]</sup>在热测序方法的基础上探究微生物生态行为与藻类生长轨迹之间的相互作用,并指出水华暴发将增强微生物碳水化合物和能量的代谢,并改

变硫循环。

### 2.5.2 藻类水华的毒性研究

水华现象作为一种“环境威胁”，其泛滥必将削弱水生生态系统的生态功能，对水生生物以及生物链上的一系列生物造成严重危害，因而水华的毒性研究也是全球水华研究的一个重要方向。常见的毒素有腹泻性贝毒(diarrhetic shellfish poisoning, DSP)、麻痹性贝毒(paralytic shellfish poisoning, PSP)、神经性贝毒(neurotoxic shellfish poisoning, NSP)、失忆性贝毒(amic shellfish poisoning, ASP)等。毒素的产生可能是在指数生长期的细胞内产生，同时也有可能是浮游植物由于环境介导而通过化感作用释放<sup>[62]</sup>。毒素检测方法包括传统的生物测定和化学测定方法，其中生物测定的方法常因其低灵敏性造成测定结果不准确而被遗弃，目前常用的毒素检测方法为HPLC和质谱分析法(liquid chromatography tandem mass spectrometry, LC-MS)。与此同时，藻类毒素的开发利用也成为毒性研究的热点，如利用软骨藻酸、河豚毒素等合成止痛药等一系列药物<sup>[15]</sup>。

### 2.5.3 藻类水华的监测与治理研究

水华的微观监测方面即为水华藻类的鉴定和识别。近年来，基于宏条形码技术进行藻类识别的方法打破了传统显微镜鉴定技术费时费力的困境，提高了藻类识别鉴定的准确性和特异性。而这种基于分子生物学的方法在近10年内快速发展，并由于其识别准确性高、方便快捷的优点被广泛应用。水华宏观尺度方面的监测则是指利用卫星影像、无人机影像等实现水华整体状况的动态预警识别。基于现代大数据、人工智能技术和遥感技术，建立水域监测网络，可以实现水资源-水环境-水生态关键因素的多源、高时空分辨率的遥感预警和监测，以快速精准捕捉藻类水华的动态变化，为即将暴发的水华事件做好科学、规范、经济、高效的风险评估、应急措施和灾后补救计划。在水华的治理研究方面，利用溶藻细菌、利用氮限制、投入过氧化氢、收集石莼、利用改性黏土使其沉降等方法层出不穷。未来，为实现更加精准、高效、灵活的水华监测与治理，多学科交叉、多尺度融合将成为热门研究趋势。

### 2.5.4 中国水域的水华研究

由关键词聚类结果(图S4、S5)可以看出，中国的水华问题备受国内外学者的广泛关注，南海、太湖、巢湖、滇池、东湖和三峡库区、黄海等水域成为热点研

究区域。内陆湖泊水库水华现象是当前我国水环境面临的主要生态环境问题，赤潮频发也是我国近海地区生态环境面临的主要威胁之一。如在藻类水华的生物学和生态学研究方面，温舒珂等人<sup>[63]</sup>利用非度量多维尺度分析和随机森林对太湖梅梁湾底栖动物的群落结构特征及其演变规律展开分析，并指出水生植物的演替也会对底栖动物群落产生重要影响。水华的毒性研究方面，目前国内对微囊藻毒素的研究较为集中，麻痹性贝类毒素则是我国沿海地区最突出的一类藻毒素，而酶联免疫吸附法与液相色谱串联质谱法结合将替代传统生物实验法和液相色谱法，成为精准快速的毒素检测方法<sup>[64]</sup>。在藻类水华的监测与治理研究方面，Wang等人<sup>[65]</sup>利用视频图像和语义分割的方法对巢湖湖岸带的蓝藻水华展开了实时动态监测，并计算出蓝藻水华的覆盖面积，为湖岸带的科学规划提供了技术支撑。综上所述，中国水华研究在全球水华研究中占据重要地位。

## 3 本研究不足之处

本研究只针对发表的中英文期刊文献进行分析，尽管已经涵盖绝大多数水华相关研究成果，但是少部分其他语言发表的期刊文献(如日本琵琶湖的水华研究可能有一定数量的日文文献发表)，以及会议论文、学术专著、专利等可能包含重要的学术研究成果。由于CiteSpace软件对原始数据的限制，仅能对WOS核心数据库中的期刊文献进行科学知识图谱分析。同样，少部分不在核心库中的期刊文献可能包含重要的研究成果，亟待进一步收集和分析。

## 4 结论与展望

本文从计量统计学出发，以WOS数据库和CNKI数据库检索的文献为研究对象，运用Origin 2022、CiteSpace等软件对文献发表数量、核心期刊、发文作者、载文期刊、国家(或地区)、关键词、突变词等进行可视化分析操作，对全球水华研究的总体概况进行了阐述，并分析了水华研究领域的相关前沿、热点问题。分析结论如下。

(1) 从计量统计的角度来看，可以大致将全球水华研究分为3个阶段，即1942~1990年的第Ⅰ阶段、1991~2014年的第Ⅱ阶段和2015年至今的第Ⅲ阶段。随着全球水华研究的不断发展，其研究内容逐渐由地区(区域)尺度、初步认知介绍向全球尺度、长时序特

征、生态系统效应、人工智能技术相融合的方向发展。全球水华研究的发文量逐年增多,但从增速来看,研究热度近年相对下降。国际上以美国发文量最多,而国内的水华研究则以中国科学院为中心形成协作网络。从期刊和作者发文量来看, *Harmful Algae* 和《湖泊科学》是有关水华研究发文量最多的期刊, Paerl 和吕颂辉分别是检索结果内发文量最多的国际和国内学者。

(2) 从科学知识图谱分析来看,对于水华研究领域的国际交流合作,各个国家和地区均保持着较为密切的联系; *Limnology and Oceanography* 作为被引频次和中介中心性均最高的节点,其所发表的研究成果对推动全球水华的发展起到极大的促进作用;国际上水华研究的基础内容包括有害藻华的毒理学研究、水华的生消机理研究、赤潮的生态学研究、藻华危害及防控的研究等。而近10年来,研究热点主要向气候变化影响下水华生消机理的响应、有害藻华对生态系统造成的风险评估、遥感大数据等人工智能技术相结合等方向发展。而国内水华研究的主要内容与国际基本吻合,但由于国内的研究发展历程较短,相较于英文期刊的研究结果,中文期刊在新兴前沿领域方面可能稍滞后于国际。如当前阶段国际上的前沿领域可能出现在水华治理(氧化应激)方向,而国内的前沿领域则可能出现在国际上第Ⅱ发展阶段的蓝藻水华方向。

有害藻华已经在全球各种水域中发生。由于全球变化及人类活动等因素,近10年内水华现象有扩张趋势。水华现象的激增对生态环境造成严重破坏,对社会经济和人类健康产生重要影响。因此,针对暴发规模扩大、持续时间增长、致灾效应愈重、全球扩张愈发明显的有害水华灾害,有必要加强以下几方面的研究工作。

(1) 积极推动国际交流与合作。对于未来全球水华

研究的发展,良好的交流与合作是推动水华研究发展的重要动力,国家(地区)之间、研究团队之间和研究人员之间必须保持密切联系,才能更好地推动该领域的发展。

(2) 强化水华研究的多尺度结合。空间尺度上全球、国家、区域、单个水体不同空间位置的水华灾害发展趋势的研究;时间尺度上的高频动态,以及日际、月际、年际、长时序的分布及变化特征研究;学科尺度上从生态学、地理学、生物学、海洋学等不同学科角度对水华形成的环境驱动机制和水华藻类的生理生态研究等。

(3) 重点突出对水华形成和消亡的机制性研究。推动更多的水华野外观测、实验研究和数值模拟研究手段的进步,实现这些手段的有效结合;积累水华发生与消亡现象、关键过程的大量数据和成果,不断深入揭示水华发生与消亡规律。

(4) 高度重视水华全生命周期过程生态环境效应的定量化研究和人类活动与水华发生的互馈机制研究。藻类水华作为生态系统的组成部分,其与生态环境的关系和人类的互馈关系不容忽视。

(5) 推动水华自动监测预测系统的建设和大数据分析研究。利用大数据、人工智能以及遥感技术等建立精准、高效的水华自动监测预测系统,提高监测的时空分辨率,提高定量化研究的水平;推动大数据分析在水华研究中的应用,建立监测、文献、遥感和网络等多源数据组成的水华研究数据库。

(6) 加强水华灾害的预防与治理。集成各种物理、生物、化学技术和方法,治理已发生水华的水域,同时对易暴发水华的水域展开针对性的研究,从源头进行治理。加强水华藻类的资源化利用研究与产业化运营,尽量减少藻华灾害带来的环境、经济和健康危害。

## 参考文献

- 1 Qin B Q, Yang G J, Ma J R, et al. Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 759–770 [秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制. 科学通报, 2016, 61: 759–770]
- 2 Gray A, Krolkowski M, Fretwell P, et al. Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. *Nat Commun*, 2020, 11: 2527
- 3 Oziel L, Baudena A, Ardyna M, et al. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean. *Nat Commun*, 2020, 11: 1705
- 4 Brookes J D, Carey C C. Resilience to blooms. *Science*, 2011, 334: 46–47
- 5 Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, 574: 667–670
- 6 Qin B, Zhu G, Gao G, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environ Manage*, 2010, 45: 105–112



- 7 Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. Cyanobacterial blooms. *Nat Rev Microbiol*, 2018, 16: 471–483
- 8 Bernard S, Kudela R, Velo-Suarez L. Developing global capabilities for the observation and predication of harmful algal blooms. In: Djavidnia S, Cheung V, Ott M, eds. *Oceans and Society: Blue Planet*. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing, 2014
- 9 Le Moal M, Gascuel-Oudou C, Ménesguen A, et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Sci Total Environ*, 2019, 651: 1–11
- 10 Wheeler R E, Lackey J B, Schott S. A contribution on the toxicity of algae. *Public Health Rep*, 1942, 57: 1695–1701
- 11 Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol Appl*, 1998, 8: 559–568
- 12 Wang W. A preliminary study on the bloom of green euglenas in high-yielding adult pond orchid (in Chinese). *Freshw Fish*, 1978, (6): 22–29 [王武. 高产成鱼池兰绿色裸甲藻水华的初步研究. *淡水渔业*, 1978, (6): 22–29]
- 13 Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2005, 25: 589–595 [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. *生态学报*, 2005, 25: 589–595]
- 14 Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in Lakes. *Science*, 1977, 195: 260–262
- 15 Yu Z M, Chen N S. Emerging trends in red tide and major research progresses (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2019, 50: 474–486 [俞志明, 陈楠生. 国内外赤潮的发展趋势与研究热点. *海洋与湖沼*, 2019, 50: 474–486]
- 16 Zou J Z, Dong L P, Qin B P. Preliminary discussion on eutrophication and red tide in Bohai Bay (in Chinese). *Mar Environ Sci*, 1983, 2: 41–54 [邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. *海洋环境科学*, 1983, 2: 41–54]
- 17 Zhou M J, Zhu M Y, Zhang J. Status of harmful algal blooms and related research activities in China (in Chinese). *Chin Bull Life Sci*, 2001, 13: 54–59 [周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. *生命科学*, 2001, 13: 54–59]
- 18 Chen N S, Huang H L. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide spaces in China ( I ). The Bohai Sea (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2021, 52: 346–395 [陈楠生, 黄海龙. 中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(一): 渤海. *海洋与湖沼*, 2021, 52: 346–395]
- 19 Chen N S, Cui Z M, Xu Q. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide spaces in China (IV). The Changjiang Estuary (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2021, 52: 402–452 [陈楠生, 崔宗梅, 徐青. 中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(四): 长江口. *海洋与湖沼*, 2021, 52: 402–452]
- 20 Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science*, 1974, 184: 897–899
- 21 He J W, He Z R, Yu J L, et al. Isolation and identification of toxins contained in *Microcystis aeruginosa* from Donghu Lake, Wuhan (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1988, 19: 424–430 [何家苑, 何振荣, 俞家禄, 等. 东湖铜绿微囊藻毒素的分离与鉴定. *海洋与湖沼*, 1988, 19: 424–430]
- 22 Fasham M J R, Ducklow H W, McKelvie S M. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *J Mar Res*, 1990, 48: 591–639
- 23 O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J Geophys Res Oceans*, 1998, 103: 24937–24953
- 24 Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangze River (in Chinese). *J Lake Sci*, 2002, 14: 193–202 [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. *湖泊科学*, 2002, 14: 193–202]
- 25 Heisler J, Glibert P M, Burkholder J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*, 2008, 8: 3–13
- 26 Ma R H, Kong F X, Duan H T, et al. Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China (in Chinese). *J Lake Sci*, 2008, 20: 687–694 [马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. *湖泊科学*, 2008, 20: 687–694]
- 27 Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, 320: 57–58
- 28 Kong F X, Ma R H, Gao J F, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu (in Chinese). *J Lake Sci*, 2009, 21: 314–328 [孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. *湖泊科学*, 2009, 21: 314–328]
- 29 Wang C L, Pan W Y, Han Y Q, et al. Effect of global climate change on cyanobacteria bloom in Taihu Lake (in Chinese). *China Environ Sci*, 2010, 30: 822–828 [王成林, 潘维玉, 韩月琪, 等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响. *中国环境科学*, 2010, 30: 822–828]
- 30 O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, et al. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, 14: 313–334
- 31 Ma J R, Deng J M, Qin B Q, et al. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2013, 33: 3020–3030 [马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. *生态学报*, 2013, 33: 3020–3030]
- 32 Zhang F, Wang Y, Cao M, et al. Deep-learning-based approach for prediction of algal blooms. *Sustainability*, 2016, 8: 1060
- 33 Yu J B, Shang F F, Wang X Y, et al. Cyanobacterial bloom forecast method based on genetic algorithm-first order lag filter and long short-term memory network (in Chinese). *J Comput Appl*, 2018, 38: 2119–2123, 2135 [于家斌, 尚方方, 王小艺, 等. 基于遗传算法改进的一阶滞后滤波和长短期记忆网络的蓝藻水华预测方法. *计算机应用*, 2018, 38: 2119–2123, 2135]
- 34 Li X C, Huo S L, Zhang H X, et al. Application of environmental DNA metabarcoding in monitoring cyanobacterial community (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 372–381 [李小闯, 霍守亮, 张含笑, 等. 环境DNA宏条形码技术在蓝藻群落监测中的应用. *环境科学研究*, 2021, 34: 372–381]

- 35 Hou X, Feng L, Dai Y, et al. Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade. *Nat Geosci*, 2022, 15: 130–134
- 36 Xu S, He C, Kang Z, et al. The ecological responses of bacterioplankton during a *Phaeocystis globosa* bloom in Beibu Gulf, China highlighted by integrated metagenomics and metatranscriptomics. *Mar Biol*, 2022, 169: 36
- 37 Li Y M, Tan Z Y, Yang C, et al. Extraction of algal blooms in Dianchi Lake based on multi-source satellites using machine learning algorithms (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2022, 37: 1141–1156 [李一民, 谭振宇, 杨辰, 等. 基于多源卫星的滇池藻华提取机器学习算法研究. *地球科学进展*, 2022, 37: 1141–1156]
- 38 Paerl H W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnol Oceanogr*, 1988, 33: 823–843
- 39 van den Bergh J C J M, Nunes P A L D, Dotinga H M, et al. Exotic harmful algae in marine ecosystems: An integrated biological-economic-legal analysis of impacts and policies. *Mar Policy*, 2002, 26: 59–74
- 40 Edwards M, Richardson A J. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 2004, 430: 881–884
- 41 Paerl H W, Huisman J. Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environ Microbiol Rep*, 2009, 1: 27–37
- 42 Wang H P, Xia J, Xie P, et al. Mechanisms for hydrological factors causing algal blooms in Hanjiang River—Based on kinetics of algal growth (in Chinese). *Resour Environ Yangtze Basin*, 2004, 13: 282–285 [王红萍, 夏军, 谢平, 等. 汉江水华水文因素作用机理——基于藻类生长动力学的研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13: 282–285]
- 43 Park J, Lee H, Park C Y, et al. Algal morphological identification in watersheds for drinking water supply using neural architecture search for convolutional neural network. *Water*, 2019, 11: 1338
- 44 Duan H T, Cao Z G, Shen M, et al. Review of lake remote sensing research (in Chinese). *Natl Remote Sens Bull*, 2022, 26: 3–18 [段洪涛, 曹志刚, 沈明, 等. 湖泊遥感研究进展与展望. *遥感学报*, 2022, 26: 3–18]
- 45 Hu S, Liu H B, Liu H, et al. Research on monitoring system of algae detection and classification based on deep learning (in Chinese). *Environ Monit China*, 2022, 38: 200–210 [胡圣, 刘浩兵, 刘辉, 等. 基于深度学习技术的藻类智能监测系统开发. *中国环境监测*, 2022, 38: 200–210]
- 46 Deng J M, Qin B Q. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems (in Chinese). *J Lake Sci*, 2015, 27: 1–10 [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. *湖泊科学*, 2015, 27: 1–10]
- 47 Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, et al. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years (in Chinese). *J Lake Sci*, 2019, 31: 1510–1524 [朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. *湖泊科学*, 2019, 31: 1510–1524]
- 48 Ju F, Zhang T. Advances in meta-omics research on activated sludge microbial community (in Chinese). *Microbiol China*, 2019, 46: 2038–2052 [鞠峰, 张彤. 活性污泥微生物群落宏组学研究进展. *微生物学通报*, 2019, 46: 2038–2052]
- 49 Chen C. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 5303–5310
- 50 Volponi S N, Wander H L, Richardson D C, et al. Nutrient function over form: Organic and inorganic nitrogen additions have similar effects on lake phytoplankton nutrient limitation. *Limnol Oceanogr*, 2023, 68: 307–321
- 51 Song C Y, Bai F, Li T L, et al. Inhibitory effect of *Scenedesmus* sp. on *Microcystis Aeruginosa* and its evaluation (in Chinese). *Acta Hydrobiol Sin*, 2022, 46: 1916–1923 [宋婵媛, 白芳, 李天丽, 等. 绿藻栅藻对微囊藻的抑制效应及评价. *水生生物学报*, 2022, 46: 1916–1923]
- 52 Sun R, Sun P, Zhang J, et al. Microorganisms-based methods for harmful algal blooms control: A review. *Bioresour Technol*, 2018, 248: 12–20
- 53 Li J L, Luo C L, Lü H, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi during 2002–2018 (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2023, 43: 878–891 [李加龙, 罗纯良, 吕恒, 等. 2002–2018年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子分析. *生态学报*, 2023, 43: 878–891]
- 54 Qin X N, Lu X L, Wu C Y. The knowledge mapping of domestic ecological security research: Bibliometric analysis based on CiteSpace (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 3693–3703 [秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于CiteSpace的计量分析. *生态学报*, 2014, 34: 3693–3703]
- 55 Matthijs H C P, Visser P M, Reeze B, et al. Selective suppression of harmful cyanobacteria in an entire lake with hydrogen peroxide. *Water Res*, 2012, 46: 1460–1472
- 56 Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *J Plankton Res*, 2002, 24: 417–428
- 57 Liu X, Chen L, Zhang G, et al. Spatiotemporal dynamics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake. *Water Res*, 2021, 194: 116910
- 58 Shoguchi E, Shinzato C, Kawashima T, et al. Draft assembly of the *Symbiodinium minutum* nuclear genome reveals dinoflagellate gene structure. *Curr Biol*, 2013, 23: 1399–1408
- 59 Gobler C J, Berry D L, Dyhrman S T, et al. Niche of harmful alga *Aureococcus anophagefferens* revealed through ecogenomics. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 4352–4357
- 60 Brown E R, Moore S G, Gaul D A, et al. Differentiating toxic and nontoxic congeneric harmful algae using the non-polar metabolome. *Harmful Algae*, 2021, 110: 102129
- 61 Zhou J, Richlen M L, Sehein T R, et al. Microbial community structure and associations during a marine dinoflagellate bloom. *Front Microbiol*,

- 2018, 9: 1201
- 62 Merel S, Walker D, Chicana R, et al. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. *Environ Int*, 2013, 59: 303–327
- 63 Wen S K, Peng K, Gong Z J, et al. Succession of macrozoobenthic communities and its drivers in Meiliang Bay of Lake Taihu during the past 40 years (in Chinese). *J Lake Sci*, 2023, 35: 599–609 [温舒珂, 彭凯, 龚志军, 等. 近40年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素. 湖泊科学, 2023, 35: 599–609]
- 64 Liang Y B, Li D M, Yao J Y, et al. Progresses in investigation and research on phycotoxins and toxin microalgae in the coastal waters of China (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2019, 50: 511–524 [梁玉波, 李冬梅, 姚敬元, 等. 中国近海藻毒素及有毒微藻产毒原因种调查研究进展. 海洋与湖沼, 2019, 50: 511–524]
- 65 Wang Z, Wang C, Liu Y, et al. Real-time identification of cyanobacteria blooms in lakeshore zone using camera and semantic segmentation: A case study of Lake Chaohu (Eastern China). *Sustainability*, 2023, 15: 1215

## 补充材料

图S1 总文献数量与高水平期刊发文量拟合散点图

图S2 WOS数据库检索高频关键词及其共现图

图S3 CNKI数据库检索高频关键词及其共现图

图S4 WOS数据库检索的关键词聚类图

图S5 CNKI数据库检索的关键词聚类图

表S1 全球水体发生的藻类水华记录

表S2 英文文献中藻类水华研究被引频次前十的文章

表S3 中文文献中藻类水华研究被引频次前十的文章

表S4 中英文文献中水华研究发文量前十的作者

表S5 引用突破次数最强的前25个关键词(英文)

表S6 引用突破次数最强的前25个关键词(中文)

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.



Summary for “全球水华研究的科学知识图谱分析”

# Analysis on scientific knowledge graph of global algal bloom studies

Wei Hu<sup>1,2</sup>, Jianrong Ma<sup>1,2\*</sup> & Boqiang Qin<sup>3\*</sup><sup>1</sup> Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;<sup>2</sup> Chongqing College, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;<sup>3</sup> State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China\* Corresponding authors, E-mail: [majianrong@cigit.ac.cn](mailto:majianrong@cigit.ac.cn); [qinbq@niglas.ac.cn](mailto:qinbq@niglas.ac.cn)

Worldwide, proliferating harmful algal blooms (HAB) have been an ecological catastrophe with negative impacts on ecosystem health, safe water use and sustainable socioeconomic growth. HABs impact nutrient-overenriched eutrophic freshwater and marine water bodies. Here, we searched the HAB literature database for English and Chinese journal articles. Then, we utilized CiteSpace and other software to analyze its scientific knowledge graphs. The results showed: (1) Growing attention and concern about the proliferation and intensification of HABs since the 1940s. Currently, more than 44000 publications (including 172 highly cited papers) have been published in English and Chinese journals. (2) Based on annual publication volume, global HAB research can be roughly divided into three periods: I (1942–1990, <200 articles per year), II (1991–2014, 200 to 2000 articles per year), III (from 2015 to the present, >2000 articles per year). (3) Prof. Paerl (153 papers) and Prof. Songhui Lü (77 papers) were the scholars with the most publications in English and Chinese articles, respectively. The most prevalent journals for HAB research publications are *Harmful Algae* and *Journal of Lake Sciences* in English and Chinese journals, respectively. The findings published in *Limnology and Oceanography* are crucial to an in-depth understanding of HAB dynamics. (4) The largest source of English literature is the United States and the second is China. There is a growing amount of international interaction and collaboration in HAB research. In Chinese publications, the Chinese Academy of Sciences is at the core of collaborative networks conducting HAB research in China, and its major standing on algal bloom research is on par with the international levels. (5) In terms of worldwide HAB research, Chinese HAB research has a significant place. However, Chinese journal articles' research output appears to lag behind that of English journal articles in terms of new directions and perspectives. (6) The co-occurrence of the keywords reveals the popular topics in HAB research. Emergent words reveal new research directions and emerging perspectives. The primary themes of global HAB study are reflected in keyword clustering, which also signals future directions and developments.

Multi-disciplinary and multi-scale research approaches have served as a catalyst for an improved understanding of the complex and interactive factors controlling HAB establishment, proliferation and ultimately control. On a geographical scale, the focus on HAB dynamics now includes spatio-temporal studies of global, national, regional, and local water bodies. On the temporal scale, the focus is on HAB dynamics in extensive time series such as yearly, monthly, daily or even shorter term. On a disciplinary level, researchers are examining bloom-forming mechanisms and environmental drivers from biogeochemical, ecological, and geographic perspectives along the freshwater to marine continuum.

Research techniques such as HAB monitoring and early warning models, remote sensing, on-line video observation, and image analysis will also be crucial. Big data and artificial intelligence analysis may be crucial methods for next study, since they are based on field observations, experimental studies, and numerical simulations. Future research will continue to focus on the mechanisms that govern how blooms are formed, proliferate and dissipate, as well as how environmental factors (both biological and abiotic) mediating these processes. Future research topics that may be significant include the quantitative analysis of the ecological and environmental effects of the entire life cycle process of algal blooms (including the impact on aquatic ecosystems, climate change, and human health, among other things), as well as the reciprocal feedback mechanism between human activities (including treatment and sewage discharge), climate change and extremes (floods, droughts, atmospheric changes and perturbations) and algal blooms.

**algal blooms, scientific knowledge graphs, phytoplankton, eutrophication, red tide**doi: [10.1360/TB-2023-0062](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0062)