

湖沼学是研究内陆水体的多学科整合科学 ——兼论我国湖沼学发展面临的挑战与机遇*

刘正文^{1,2,3**}, 苏雅玲¹, 杨柳¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 暨南大学生态学系, 广州 510632)

(3: 中国-丹麦科学与教育中心, 北京 100190)

摘要: 湖沼学是研究内陆水体的多学科交叉综合性科学, 自从 Forel F.A. 于 1892 年首次对湖沼学做出定义以来已有近 130 年历史. 湖沼学的主要分支学科包括地质湖沼学(包括古湖沼学)、物理湖沼学、化学(生物地球化学)湖沼学和生物湖沼学. 湖沼学的关键自然属性是通过跨学科整合, 从水生态系统水平综合分析相关过程与机理, 并对生态系统变化进行预测. 因此, 湖泊学也是支撑水资源与生态系统保护、管理与修复的核心科学. 然而, 目前我国湖沼学发展面临分支学科发展不平衡、研究碎片化等问题, 而人类活动加剧和气候变化对内陆水体生态系统的影响及管理对策是湖沼学研究面临的挑战与机遇. 我国湖沼学研究亟需围绕人类活动、气候变化的影响, 重点开展以下几个方面的工作: 1) 水动力与水文地貌特征变化及其环境生态效应; 2) 营养盐和有机质生物地球化学循环及其环境生态效应; 3) 食物网结构与功能; 4) 外来入侵物种的影响与控制对策; 5) 与水环境有关的传染病防治; 6) 地表水生态评价; 7) 生态系统演变机理与退化生态系统修复等.

关键词: 湖沼学; 历史; 水资源; 生态系统; 管理

Limnology is a multidisciplinary and integrative science for studying inland waters: With special reference to the challenges and opportunities for the development of limnology in China*

LIU Zhengwen^{1,2,3**}, SU Yaling¹ & YANG Liu¹

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China*)

(3: *Sino-Danish Center for Education and Research, Beijing 100190, P.R.China*)

Abstract: Limnology is a multidisciplinary and integrative science studying inland waters, having a history of nearly 130 years since Francois Alphonse Forel defined it firstly in 1892. The main subdisciplines include geological limnology (including paleolimnology), physical limnology, chemical (biogeochemical) limnology and biological limnology. The key feature of limnology is the interdisciplinary nature that is achieved by integrating different disciplines to synthesize the process and mechanisms at the level of the ecosystem, and to predict the ecosystem changes. Therefore, limnology is the key science supporting the protection, management and restoration of inland water ecosystems and water resources. However, the development of limnology in China is faced with the problems such as unbalanced development in subdisciplines and fragmentation in researches. The effects of increased human activities and global changes on inland waters are the challenges and opportunities for limnological researches. The main research topics in China need to focus on the effects of human activities and global changes on inland waters, including: 1) the changes in hydrodynamics and hydromorphology and their ecological and environment effects; 2) nutrient and organic matter biogeochemical cyc-

* 2020-07-18 收稿; 2020-07-21 收修改稿.

中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目(NIGLAS2017GH01)和中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-038)联合资助.

** 通信作者; E-mail: zliu@niglas.ac.cn.

ling and the associated ecological and environment effects; 3) structures and functioning of food webs; 4) impacts of invaded species and managements; 5) the control of water associated diseases; 6) ecological quality assessments of surface waters; 7) ecosystem evolution and the mechanisms, and restoration of degraded ecosystems.

Keywords: Limnology; history; water resources; ecosystems; management

地球可以说是个“水”球,因为地球表面绝大部分被水覆盖。水是人类社会经济发展的重要资源。然而,全球只有大约 2.5% 的水为淡水资源,而这部分水资源绝大部分(约 68.7%)储存于冰盖和冰川,29.9% 以地下水的形式存在,而真正能被人类开发利用的淡水地表水(淡水湖泊、河流等)资源只有约 0.26%^[1]。湖泊、河流等内陆水体生态系统不仅为人类提供饮用水资源,还服务于交通、灌溉、水电、渔业、矿产、娱乐等产业,同时具有污染物净化和气候调节等生态服务功能。人类的开发利用无疑会消耗有限的淡水资源,水污染等人类活动导致的水体生态系统退化还进一步加剧了水资源的紧缺,同时威胁着人类健康。随着人口的增长和经济的发展,对水资源的需求不断增加,加上全球变化的影响,水资源与水生态系统安全将成为社会经济可持续发展的最重要制约因素^[2]。要实现水资源的可持续利用,保护、管理和修复受损水体生态系统,必须从生态系统水平开展研究,并预测生态系统对未来环境变化和人类干预的响应。基于水体生态系统的复杂性和功能的多样化,单一学科的研究难以应对水资源面临的挑战。湖沼学作为研究内陆水体生态系统的交叉学科,其研究成果已被证明是进行水体生态系统保护、评价和修复的核心科学依据,也为发展相关技术提供了理论基础^[3]。

1 湖沼学的由来、内涵与分支学科

早在 15 世纪,人类就开始观测研究湖泊等水体,研究的内容包括水生生物分类、水量观测、水温测量等^[4]。我国对湖泊、池塘的利用甚至可以追溯到 3 千年以前^[5]。然而,人类对湖泊等水体的综合研究主要从 19 世纪下半叶开始。1887 年美国学者 Forbes S.A. 把湖泊视为“微宇宙”系统,明确地把湖泊作为一个系统进行研究^[6]。瑞士学者 Forel F.A. 于 1869 年首次使用了湖沼学(Limnology)这个概念,并在关于日内瓦湖研究的专著《莱芒湖(日内瓦湖):湖泊学专论》(Le Léman: Monographie Limnologique)(1892—1902 年出版)第 1 卷中对湖沼学进行了定义与描述,标志着湖沼学的诞生^[7]。因此,Forel 被誉为湖沼学之父。

Forel 在洛桑大学教授解剖学和生理学,但对湖泊研究有浓厚的兴趣,在日内瓦湖进行了长达几十年的研究与观测。《莱芒湖(日内瓦湖):湖泊学专论》共 3 卷,第 1 卷和第 2 卷介绍了日内瓦湖的地质学、物理学和化学特征,第 3 卷介绍了其生物学特征。Forel 认识到生物、气候、水文、地质和理化环境之间的关系,因此,湖沼学自从诞生起就是一门以生态系统为视角、依托多学科研究内陆水体的交叉学科,涉及的主要学科包括物理学、化学、地质学或地理学和生物学等。由于日内瓦湖的论著太过于详细具体,不适合作为教材,Forel 于 1901 年出版了《湖泊研究手册:普通湖沼学》(Handbuch der Seenkunde: Allgemeine Limnologie)^[8],该手册是第一本湖沼学教材。

另外一部对湖沼学发展起到重要推动作用的巨著是 Hutchinson G.E. 编写的《湖沼学论》,共 4 卷,3785 页。第 1 卷是关于湖泊地理学、物理学与化学;第 2 卷关于湖泊的浮游植物和浮游动物,第 3 卷是关于水生植物学(底栖植物),包括大型藻类、苔藓、维管束植物和附着藻类;第 4 卷是 Hutchinson 去世后 Edmondson Y.H. 根据他的手稿整理编辑出版的,内容关于底栖动物。Hutchinson 在湖泊多个方面做出了杰出贡献,包括湖泊代谢、地球化学、古湖沼学、浮游植物多样性等。Kalf J.^[4]认为,考虑到湖沼学的迅速发展和分支领域的深入,任何人再试图做出这样全面的综合分析是相当困难的。

早期湖沼学主要关注的是湖泊,所以湖沼学也称湖泊学^[7]。1922 年,由德国湖沼学家 Thienemann A. 和瑞典湖沼学家 Naumann E. 发起成立的国际理论与应用湖沼学会(Societas Internationalis Limnologiae, SIL)^①在德国基尔成立,并召开第一次湖沼学大会。大会把所有内陆水体都纳入湖沼学研究范围,包括湖泊、池塘、河流、湿地等。

① 英语名称为 International Association of Theoretical and Applied Limnology,现改成国际湖沼学会(International Society of Limnology)。

湖沼学作为交叉综合学科,可以分为以下4个主要分支学科:1)地质湖沼学(Geological Limnology):主要研究水体及其流域格局、形态及其空间与时间演变规律等.根据沉积物记录开展水体历史演变规律的研究又称古湖沼学(Paleolimnology),而在湖泊开展地质学研究的学科称为湖沼地质学(Limnogeology),这两个学科有重叠,但重点不同,古湖沼学研究的重点是揭示湖泊生态系统演变,而湖沼地质学的重点是通过湖泊沉积物等材料研究地质时间尺度的环境变化,包括陆生生态系统和气候变化等^[9].2)物理湖沼学(Physical Limnology):主要研究水体的光学特征、热与气体的传输、水运动、悬浮物(泥沙)沉降以及化学、生物特征与物理特征的相互影响等.3)化学湖沼学(Chemical Limnology):主要研究水体中化学组分的组成与分布、输移与滞留、形态转化等.由于化学组分的形态转化一般都受到生物,尤其是微生物的影响,因此化学湖沼学也可称为生物地球化学湖沼学(Biogeochemical Limnology).4)生物湖沼学(Biological Limnology):主要研究水体中生物的分布、功能、相互作用,不同类群生物对环境的进化适应以及对水体生态系统的影响,包括全生态系统代谢和元素生物地球化学循环等^[3, 10].生物湖沼学与生态学的内容重叠较多,以湖泊、河流为对象开展生态学研究的分支学科也称为湖沼生态学(Limnoecology)^[11].

虽然湖沼学可以分为多个分支学科,不同学者在各分支学科可能有深入的研究,但湖沼学的主要特点是多个分支学科交叉与整合.由于湖沼学多学科与跨学科整合的属性,著名生态学家、湖沼学家 Likens G.E.认为湖沼学是自然科学之王^[10].多学科的交叉与整合是在研究水体生态系统中各要素相互作用的基础上,通过揭示整体生态系统特征及其在人类活动和气候变化影响下的演变过程,并对其趋势进行预测等研究实现的^[3, 12].如气候变暖对深水湖泊初级生产力的影响涉及到物理学、化学、地质学、水文学、生态学等多学科的内容与研究手段:1)增温可以直接影响浮游植物的生长;2)增温会导致水的密度变化,从而引起水动力过程的变化,结果会提高湖泊热分层的稳定性;3)水温升高本身可以影响湖泊生物地球化学过程,同时湖泊热分层稳定性的提高会削弱湖上层和湖下层的混合,湖上层进入湖下层的溶解氧会减少,这会加剧湖下层的缺氧程度,从而导致沉积物和上覆水界面生物地球化学过程的变化,沉积物磷释放和上覆水磷含量会增加;4)由于湖泊分层稳定性的增加,会减少湖下层营养盐向湖上层的输移,浮游植物可能受到更强的磷限制;5)增温会导致鱼类小型化,而鱼类对浮游动物的牧食随个体减小而增加,因此浮游植物受到的牧食压力可能会降低,从而有利于浮游植物的生长;6)从流域进入湖泊的营养盐负荷也受气候变化的影响;7)在研究中还需要运用数学模型和古湖沼学手段^[13-17].因此,没有多学科参与的研究和跨学科的整合,难以揭示气候变化对湖泊的影响及其机理(图1).

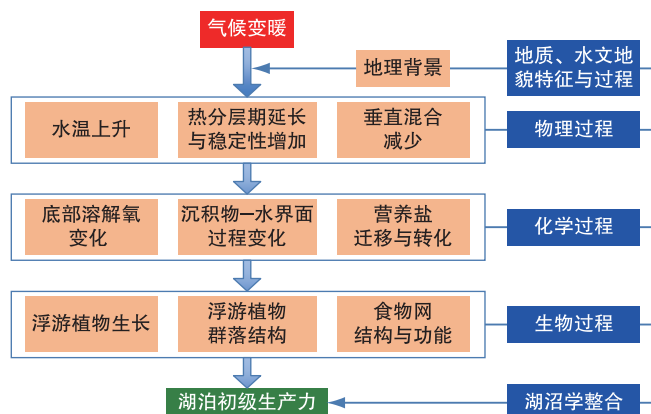


图1 气候变暖对深水湖泊初级生产力的影响研究与湖沼学的关系

Fig.1 The relationship between the study on the effect of climate warming on primary productivity of deep lakes and the science of limnology

2 湖沼学与社会经济发展

跟其他一些自然科学一样,早期湖沼学研究往往是个人兴趣驱动的. 湖泊等水体是重要的自然资源,与人类社会经济发展息息相关^[5]. 湖沼学是指导淡水资源保护和开发的核心学科,水资源开发利用等社会需求也是湖沼学发展的重要推动力,同时也影响湖沼学的发展方向和重点.

淡水渔业资源开发与水产养殖、地表水健康评价、水污染防治和生态系统修复等都离不开湖沼学. 湖沼学研究是进行鱼类资源科学开发利用的基础,1949年后,为发展湖泊渔业我国湖沼学研究人员开展了大规模的湖沼学调查. 1950年开始对太湖的五里湖进行了湖沼学的综合调查,并对水化学和生物指标进行了逐月监测,为鱼类养殖提供依据^[18],部分成果陆续在1962年发表^[19]. 1953年开始,在长江中下游和淮河流域开展了湖泊调查研究,并出版了《湖泊调查基本知识》,指导湖沼学调查工作,为湖泊四大家鱼放流等渔业开发提供了科学依据^[20-21].

湖泊富营养化发生机理与管理对策也是湖沼学应用的经典案例. 1960s 欧美湖泊富营养化加剧,一些湖泊(包括美国五大湖之一的伊利湖)藻类水华严重,究竟何种营养盐是限制因子或导致浮游植物水华发生存在巨大争议. 含磷洗涤剂制造商们最初认为碳输入最有可能是导致湖泊富营养化的原因,后来又认为氮输入是主要原因^[22]. 为进一步说明藻类水华发生与营养盐之间的关系,加拿大政府于1968年在安大略省建立了湖泊实验区(experimental lake area, ELA),以开展全湖实验研究富营养化发生机理与控制对策^[23-24]. Johnson W.E.和 Vallentyne J.R.领导的湖沼学团队开展了一系列的全湖实验. 编号为226的湖泊被围隔分为两个湖区,一个加碳和氮,另一个加碳、氮和磷. 结果发现加磷的湖区出现严重的蓝藻(螺旋鱼腥藻 *Anabaena spirioides*)水华,而只加碳和氮的湖区没有出现浮游植物水华. 因此,该研究证明磷是导致富营养化的关键因子^[25](图2a). 控制流域进入水体的磷逐步成为湖泊富营养化控制的主要措施,包括污水处理厂除磷工艺的增加、无磷洗衣粉的使用,以及农田磷肥施用限制与农业面源磷的控制等.

通过研究湖泊磷循环,尤其是沉积物-水界面磷迁移及其与沉积物性质、生物群落结构之间关系等湖沼学研究,发展的湖泊修复措施与技术在一些浅水富营养化湖治理中得到了成功应用,主要措施包括:1)通过沉积物磷的钝化控制内源磷负荷;2)通过重建沉水植物群落进一步降低沉积物-水之间磷的交换速率;3)通过食物网调控提高下行效应,同时控制上行效应(减少底栖鱼类对沉积物的扰动,从而降低磷释放和再悬浮等)(图2b)^[26-28].

以往水资源与水环境评价和管理主要依靠环境化学、水文学或水利工程学等学科的支持^[12,30]. 随着人类对水生态功能认识的深入,地表水的生态质量评价和修复得到重视. 根据欧盟2000年颁发的水框架指令



图2 (a)加拿大实验湖泊区226号湖(东北湖区(图中上部湖区)添加了碳、氮和磷,出现了严重的蓝藻水华(螺旋鱼腥藻),而西南湖区(图中下部湖区)只添加了碳和氮,没有出现蓝藻水华^[25],这张图被认为是湖沼学历史中最有影响的一张图片^[29]);(b)湖北省洋澜湖修复和未修复区对照(修复区(图中上部湖区)通过沉积物磷钝化、沉水植物群落重建和食物网调控重建了湖泊清水态,与富营养化严重、浮游植物生物量高的未修复区(图中下部湖区)形成鲜明的对照^[26])

Fig.2 Lake 226 in experimental lake area of Canada (a) (the northeastern basin was added with C, N and P and had serious blooms of *Anabaena spirioides*, but the southwestern basin was added with C and N and had no blooms), this photo is regarded as the most powerful image in limnological history); Comparison of restored and un-restored areas of Lake Yanglan in Hubei Province (b) (the clear-water state was restored by sediment P immobilization, submerged macrophyte re-establishment and food web manipulation in contrast with the un-restored area with a high biomass of phytoplankton due to eutrophication)

(Water Framework Directive, WFD)的要求,欧盟成员国地表水需要达到良好的化学和生态状态,并确定浮游植物、大型水生植物、底栖无脊椎动物和鱼类为生物评价指标,结合水体营养盐、水文地貌和水文连通性等理化指标对地表水进行生态评价^[2,31].完善的指标体系必须通过大量研究建立生物指标与水环境、水文和物理特征变化之间的关系,而这种关系还会因地表水流域地质、气候条件不同而不同,因此湖沼学研究能为地表水评价提供核心科学支撑^[32].

3 我国湖沼学发展面临的挑战与机遇

我国开展湖沼学综合研究是在1949年以后,随着国家对自然资源调查和国民经济发展的重视,1950s开始开展大规模的湖沼学调查和多个湖泊的综合研究工作^[5,21,33-35].另外,1949年后,兴修了大量蓄水、提水、引水工程,在灌溉、发电、防洪、航运等方面发挥了重要作用,促进了社会经济的发展^[36].

随着社会发展,人类活动对湖泊、河流等生态系统的影响不断增加,加上气候变化的影响,生态系统退化加剧,不仅降低了生物多样性,也导致水质下降,水质型缺水日益严重^[37-38].保护、修复湖泊和河流生态系统,为社会经济可持续发展提供支撑给湖沼学发展带来了挑战与机遇.同时,我国湖沼学学科发展面临很多需要解决的问题,解决好这些问题,才能更好地迎接挑战,把握机遇,为社会经济发展做出更大贡献,完善发展湖沼学学科.

3.1 我国湖沼学研究发展面临的挑战与机遇

3.1.1 分支学科发展不平衡,之间的交流有待加强 目前,我国化学和生物湖沼学的研究相对较多,物理湖沼学的研究较少,尤其缺乏湖泊水文水动力方面的研究,有关水文水动力的研究多见于河流.而分支学科间的交流也多见于化学和生物学或生态学,水文水动力学与化学或生物学交叉研究比较少,现有水文水动力学过程及其环境生态效应方面的研究多是水文水动力专业人员完成的,缺乏与地球化学和生态学学科的深度融合或整合.生物湖沼学或化学湖沼学方面的研究往往缺乏水文水动力机制方面的探讨,如浅水湖泊沉水植物消失导致沉积物再悬浮和磷释放速率增加,其重要的机理是沉积物-水界面水动力条件的变化,不同沉水植物种类影响不同,相关研究有待加强.

3.1.2 研究碎片化严重,从生态系统视角出发、跨学科整合的综合研究不足 湖沼学不是分支学科的简单叠加,而是需要通过跨分支学科的整合,形成生态系统整体水平的认识和知识.随着相关基础学科知识的积累和研究手段的发展,学科分化日益精细,学科分支不断增多,研究人员对自身领域问题探索的深度不断增加.如分子生物学技术的发展,使各种类群生物的系统发育研究得到快速发展.这种趋势也体现在湖沼学研究中,科学家更多关注自己分支学科中问题的深入探索,多学科大团队联合开展的研究越来越少,研究的碎片化现象日益严重.因此,作为综合性强的交叉学科,湖沼学发展面临严峻的挑战^[39].对于湖泊、河流资源利用、管理与修复,必须制定生态系统水平的综合解决方案,而不是水资源、生物资源等专项方案的简单组合^[12].

例如,采用调水控制浅水湖泊富营养化和蓝藻水华的研究或工程效应评估主要由水文水动力学专业技术人员完成.尽管调水对湖泊水动力条件的影响需要物理湖沼学的基础研究和知识,然而要较准确地评估水动力条件变化对富营养化过程和蓝藻水华的影响,必须有营养盐地球化学和生态等领域的研究人员参与.调水导致的水动力条件变化不仅影响营养盐的输移,也影响营养盐形态变化、沉积物-水界面过程以及浮游植物生长等,包括磷沉降和释放、氮的硝化反硝化过程等,而沉水植物群落和食物网结构也会受到水动力条件变化的影响,从而影响浮游植物的生长和蓝藻水华的强度^[15].因此,没有多学科联合调查研究和跨学科整合,难以获得较准确的评估,也不可能较好地预测生态系统(包括蓝藻水华)对水动力条件变化的响应.

3.1.3 社会公众对湖沼学的了解较少,社会经济参与的参与度有待提高,同时要加强湖沼学人才培养 湖沼学被证明在水生态系统保护与修复等领域能起关键作用,如湖泊富营养化控制与生态系统修复等.但在有关项目的立项、评审与咨询过程中湖沼学者参与度较低或没有起到关键作用(只是作为一般参加者).这可能有两方面的原因,一方面是能从生态系统水平把握问题的湖沼学者不多;另一方面是社会对湖沼学的了解有限,大学本科和研究生很少有湖沼学课程.因此,湖泊、河流保护与修复方面的项目立项、评审等参与较多的是环境化学、水处理或水利等领域的专家,湖沼学专家参与较少,类似的问题同样存在于美国,而欧盟

情况相对较好^[3,32]。随着社会对水体治理的重视,近些年我国情况有所改善,公众对湖沼学的了解有所增加。要使湖沼学在社会经济发展中发挥更大的作用,需要在大学本科和研究生教育中加强湖沼学课程教学,科研院所可以通过举办开放日、夏令营等形式提高公众对湖沼学学科的了解,还可以通过与高校联合开课和提供实习基地等形式加强湖沼学人才培养。

3.2 我国湖沼学未来重点研究方向

湖沼学未来的研究重点应围绕人类活动和全球变化引起的水生态系统变化机理、预测和管理对策等方面开展。

3.2.1 水动力与水文地貌特征变化及其环境生态效应 人类活动对水生态系统影响最重要的途径之一就是建坝,其对水的流态等水文水动力特征的改变是巨大的,除了影响流速、水位、流量等特征外,还会通过影响泥沙输移沉降、河床侵蚀等过程改变水体的地貌结构。我国长江中下游建坝导致的江湖隔离不仅影响湖泊水动力条件,也影响长江的物理特征。南水北调等重大水利工程对水体物理特征的影响是跨流域的。另外,增温和降雨等全球变化也会影响水体的水文水动力特征,包括湖泊热分层特征等。已有水文水动力研究主要服务于水利,与生态系统结构与功能关系的研究较少。水文水动力、水文地貌特征是决定水生态系统结构与功能的基础要素,因此相关研究不仅是分析、评价水生态系统的基础,也是揭示与预测水生态系统变化特征的重要内容^[40]。

生态系统退化过程中水动力过程与水的流态也会发生变化,如水生植物、鱼类群落变化对水动力特征与过程都有显著影响,相关研究在河流系统较多,在湖泊中较少^[41]。如富营养化导致的水生植被消失,无疑会影响到湖泊水动力过程从而又影响湖泊中氮、磷等营养盐的地球化学过程和生物过程,在浅水湖泊中对沉积物—水界面过程的影响尤为重要,是决定浅水湖泊生态类型的关键要素^[42]。同时,不同生活型植物的影响不同,群落结构演替过程中也伴随着水动力过程的变化。富营养化也是鱼类群落变化的主要驱动因素^[45],不同鱼类对水动力过程的影响不同,底栖杂食性鱼类对沉积物—水界面水动力过程的影响大于上层浮游动物食性鱼类,而研究相关水动力学不仅能更深入地了解生态系统退化机理,同时也能为生态修复过程中的鱼类群落调控提供科学依据。

3.2.2 营养盐和有机质生物地球化学循环及其环境生态效应 富营养化仍是我国水体面临的主要问题,营养盐过度输入是造成富营养化的原因。研究者在 1960s—1970s 已经认识到磷是导致水体蓝藻水华的关键因子,但对氮的影响仍然存在争议。越来越多的研究表明,不同类型水体中氮、磷的相对作用不同,如浅水湖泊和溪流生态系统多受到氮、磷的共同限制,对底栖藻类和沉水植物生长有显著影响^[43-44]。未来人类活动和全球变化可能改变氮、磷对富营养化过程和蓝藻水华影响的相对重要性^[45]。在水生态系统中,一种化学成分的变化往往会引起其他成分的变化,从而作用于整个生态系统^[38]。氮、磷等元素循环之间存在耦合作用,磷输入的变化可能影响水体氮循环,而氮输入的变化也可以影响到水中磷的浓度。硫、外源有机质的输入增加等也会影响磷、重金属等元素的循环。

有机质不仅可以为水体消费者提供能量,影响食物网的结构与功能,对磷、重金属等元素循环也有重要影响。有机质的来源复杂,包括内源(藻类、高等水生植物等)和外源(陆生植物等)。在溪流上游和流域植被丰富或具有大面积洪泛平原的水体中陆源有机质含量较高,陆源有机质除了影响元素循环、食物网结构与功能外,还可能通过影响湖泊光照、热分层等物理特征影响生态系统结构与功能。而人类活动(土地利用变化等)和全球变化也会改变地表水中有机质的组成和含量^[46-47]。

我国内陆水体类型多样,纬度和海拔跨度大,氮、磷等营养盐循环特征及其对外源负荷和气候变化的响应差异很大。这种差异不仅会受流域地质、气候和植被条件的影响,也受水体水文地貌和水生生物群落组成(如植被、食物网结构等)的影响。因此,开展我国流域或区域尺度的氮、磷、碳等元素循环及其耦合作用等研究将为我国水体生态分区以及制定在未来全球变化条件下的适应性管理对策提供科学依据。

3.2.3 食物网结构与功能 食物网主要研究种群营养关系、能量与物质流动过程与机理,是揭示生态系统生物多样性与功能维持机理的关键内容^[48]。传统的湖泊食物网研究主要集中在敞水食物网,尤其是以浮游植物为主要基础碳源的牧食食物网。而自然水体生态系统中食物网结构复杂,基础碳源丰富,包括沉水植物、底栖藻类以及陆生生态系统输入的有机碳等。我国河流、湖泊等水体中杂食性捕食者多,会同时捕食不同营

养级的生物. 有关杂食性、碎屑食物网的研究相对薄弱, 而食物网结构与元素循环、生物多样性的关系等仍然是关注的重点, 对食物网调控在湖泊富营养化管理中的应用也有重要指导作用.

如在利用鲢(*Hypophthalmichys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、罗非鱼等鱼类控制湖泊浮游植物水华的实践中, 由于相关基础研究还不足, 在一些浅水湖泊修复工程中的应用效果不理想, 甚至对水质产生负面影响. 鲢、鳙、罗非鱼是杂食性鱼类, 不仅牧食浮游植物, 也摄食浮游动物, 而浮游动物是浮游植物的有效牧食者. 同时, 鲢、鳙、罗非鱼通过影响浅水湖泊沉积物-水界面过程可能提高水中营养盐的浓度, 即使不投饵, 同样会给水质带来负面影响^[49-51]. 另一个例子是有关直接投放大型枝角类控制热带、亚热带浅水湖泊浮游植物水华的建议, 这种建议只关注了浮游动物对浮游植物的牧食, 而忽略了热带、亚热带湖泊中小型杂食性鱼类丰富, 不仅摄食碎屑、浮游植物或沉水植物, 也摄食浮游动物. 因此, 投放的浮游动物很快会因杂食性鱼类的捕食而消失, 故而在南方湖泊中难以见到大型浮游动物^[28, 52]. 开展食物网结构对湖泊地球化学过程和生物多样性的影响研究是揭示上述现象相关机理的关键, 对指导湖泊修复也有重要意义^[53].



图3 广东一河道中的水葫芦

Fig.3 Water hyacinth *Eichhornia crassipes* in a river of Guangdong Province

3.2.4 外来入侵物种的影响与控制对策 外来种入侵已经给我国部分淡水生态系统造成巨大影响, 如水葫芦(凤眼莲)(*Eichhornia crassipes*)可以直接堵塞河道(图3), 不仅改变了原有生态系统结构, 还严重影响行洪等河流的基本功能(图3). 福寿螺(*Pomacea canaliculata*)在我国淡水生态系统入侵严重, 对水生水植物群落和水稻等农作物造成一定影响, 尤其对沉水植物群落的影响可能是毁灭性的. 罗非鱼等外来种在我国南方湿地和河流等生态系统分布广泛, 成为一些水体的优势种类. 其他常见水生外来种还有喜旱莲子草(水花生)(*Alternanthera philoxeroides*)、克氏原螯虾(小龙虾)(*Procambarus clarkii*)、食蚊鱼(*Gambusia* spp.)等. 目前主要缺乏外来种对生态系统水平影响的研究, 包括对地球化学循环、食物网结构的影响等, 对外来种的控制缺乏依据, 甚至为控制一些有害生物引进外来种, 由于缺乏相关研究,

造成了严重后果. 如人们为了控制蚊媒疾病(如疟疾、登革热), 引进的食蚊鱼给当地生物多样性造成了影响, 同时通过改变水体食物网结构, 影响生态系统功能, 降低了对浮游植物水华的控制能力^[54].

一些来自热带非洲或南美洲的外来种, 如罗非鱼、福寿螺和水葫芦等, 目前入侵水域主要集中在我国南方. 随着气候变暖和生物本身适应性的变化, 入侵区域可能逐步向北推进, 需加强有关入侵种类危害与机理以及控制对策的研究.

3.2.5 与水环境有关的传染病防治研究 人类一些疾病是通过水生生物传播的, 我国常见的血吸虫病是由日本血吸虫(*Schistosoma japonicum*)引起的, 而湖泊中的钉螺(*Oncomelania hupensis*)是其唯一中间宿主. 因此控制钉螺一直是血吸虫病防治的主要措施. 蚊子可以传染登革热、疟疾等疾病, 而蚊子产卵、孵化等生命史是在水环境中完成的, 成虫羽化后才离开水体. 控制水环境中蚊虫的繁殖与生长是相关疾病预防的关键内容之一^[55-56]. 无疑, 钉螺和蚊子等与疾病传播相关水生动物的湖沼学研究是疾病有效控制的基础. 为防控血吸虫病, 一些地方直接破坏钉螺分布较多的湖泊湿地, 清除高等水生植物, 而忽略湿地在湖泊生态系统中的作用, 显然我们需要更完善的生态系统解决方案. 另外, 水环境和气候变化可能导致与水相关的疾病传播的变化, 随着人类社会对公共卫生安全的进一步重视, 与水相关的疾病防治和人类健康研究将是未来湖沼学研究的重要课题^[38, 57].

3.2.6 地表水生态评价 湖泊、河流等地表水水质恶化、蓝藻水华暴发等现象实际都是生态系统结构与功能退化的表现, 湖沼学同行逐步认识到地表水评价必须包括生态状态的评价^[30]. 欧盟颁布的水框架指令明确要求地表水首先用浮游植物、大型水生植物、底栖无脊椎动物和鱼类4类指标进行评价, 结合水文地貌和营养盐等理化指标最终确定其生态状态, 指导地表水管理与修复^[32]. 我国地表水质量评价目前还是以化学指

标为主,一些城市富营养化浅水湖泊的治理目标设定为国家地表水Ⅲ类(GB 3838—2002),总氮不超过 1.0 mg/L。考虑到城市湖泊的功能定位,城市富营养化浅水湖泊的治理目标以建立以沉水植物为优势的清水态为宜,而总氮是否能小于 1.0 mg/L 不是必要条件^[42]。我国有关水体生物生态评价的研究刚起步,随着国家对湖泊、河流等水体治理的重视和投入的加大,以生态系统结构与功能为核心的评价指标体系研究将进一步得到重视。

3.2.7 生态系统演变机理与退化生态系统修复 人类活动和气候变化是驱动水生态系统变化的主要因子,但不同生态系统响应的过程与曲线不同,这对预测生态系统变化、制定修复和管理对策极为重要^[38]。在研究富营养化浅水湖泊生态系统演变时,需要揭示湖泊生态系统对营养盐负荷的响应特征,如营养盐负荷驱动下的变化速率如何? 是否存在稳态转换? 如果存在,在哪个层次或水平(种群、群落或生态系统)存在稳态转换? 稳态转换机理与转换阈值是什么? 我国主要水生态系统对人类活动和气候变化的响应差异及其机理是什么? 这些问题的回答直接关系到生态系统修复目标、外源营养盐负荷控制力度和修复方案的确定。发挥湖沼学作为综合学科的优势,整合物理、化学、地质和生物等学科,结合古湖沼学、典型生态系统长期观测与数学模型等手段,开展大团队协作研究,才能深入揭示不同区域水生态系统退化机理与过程,更准确地预测生态系统对人类活动(包括修复措施的实施)和气候变化的响应,为地表水保护、管理与修复措施和对策提供支撑。

4 结语

湖沼学是研究湖泊、河流等内陆水体的多学科交叉综合性科学,已有近 130 年历史。湖沼学的综合性特征不是分支学科的简单叠加,而是跨学科的整合,以获得生态系统水平的了解与知识,并预测生态系统对环境变化的响应。因此,湖沼学是支撑地表水资源开发利用、水生态系统保护与修复的核心科学,其发展方向与研究重点受社会经济的影响。我国开展湖沼学综合研究是在 1949 年以后,目前学科发展面临分支学科发展不平衡、研究碎片化、公众认知度和社会经济发展参与度低等问题,人类活动的加剧和气候变化对水生态系统的影响以及管理和修复对策是湖沼学研究面临的挑战与机遇。

5 参考文献

- [1] Shiklomanov IA. Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 2000, **25**(1): 11-32. DOI: 10.1080/02508060008686794.
- [2] Moss BR ed. Ecology of freshwaters: Earth's bloodstream. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [3] Lewis WM, Chisholm SW, D'Elia C *et al*. Challenges for limnology in the United States and Canada. *American Society of Limnology and Oceanography Bulletin*, 1995, **4**: 1-20.
- [4] Kalf J ed. Translated by Gu BH, Liu ZW, Li KY *et al*. Limnology: Inland water ecosystems. Beijing: Higher Education Press, 2011: 122-126. [Kalf J 编. 古滨河, 刘正文, 李宽意等译. 湖沼学: 内陆水生态系统. 北京: 高等教育出版社, 2011: 122-126.]
- [5] Wang SM, Dou HS eds. Chinese lakes. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [6] Forbes SA. The lake as a microcosm (reprinted). *Illinois Natural History Survey Bulletin*, 1925, **15**(9): 537-550.
- [7] Egerton FN. History of ecological sciences, part 50: formalizing limnology, 1870s to 1920s. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 2014, **95**(2): 131-153.
- [8] Forel FA. Handbuch der Seenkunde: Allgemeine Limnologie. J. Engelhorn, Stuttgart, Germany, 1901.
- [9] Rosen MR, Gierlowski-Kordesch E. Limnogeology, news in brief. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(2): 913-917. DOI: 10.1007/s12665-014-3700-0.
- [10] Cole JJ. Limnology as a discipline//Likens GE ed. Encyclopedia of inland waters. Oxford: Elsevier, 2009: 6-13.
- [11] Lampert W, Sommer U eds. Limnoecology: The ecology of lakes and streams. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [12] Naiman RJ, Magnuson JJ, McKnight DM *et al* eds. The freshwater imperative: A research agenda. Covelo, CA: Island Press, 1995: 200.
- [13] George G ed. The impact of climate change on European lakes (Vol. 4). Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] Williamson CE, Saros JE, Vincent WF *et al*. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate

- change. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2273-2282. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- [15] Jeppesen E, Meerhoff M, Holmgren K *et al.* Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*, 2010, **646**(1): 73-90. DOI: 10.1007/s10750-010-0171-5.
- [16] Kernan M, Battarbee RW, Moss BR eds. Climate change impacts on freshwater ecosystems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] Woolway RI, Kraemer BM, Lenters JD *et al.* Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **41**: 338-403. DOI: 10.1038/s43017-020-0067-5.
- [18] Communication Group, Taihu Freshwater Biology Laboratory, Institute of Hydrobiology. Report on the investigation of Wuli Lake. *Chinese Science Bulletin*, 1951, (10): 1103-1106. [水生生物研究所太湖淡水生物研究室通讯组. 五里湖调查工作报导, 科学通报, 1951, (10): 1103-1106.]
- [19] Wu HW. Limnological survey of Wu-Li Lake during 1951. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1962, **1**: 63-67. [伍献文. 五里湖 1951 年湖泊学调查. 水生生物学集刊, 1962, **1**: 63-67.]
- [20] Rao QZ. Lake survey in Hubei Province. *Chinese Science Bulletin*, 1954, **5**(10): 71-77. [饶钦止. 湖北省湖泊调查. 科学通报, 1954, **5**(10): 71-77.]
- [21] Rao QZ ed. Basic knowledge of lake survey. Beijing: Science Press, 1956. [饶钦止. 湖泊调查基本知识. 北京: 科学出版社, 1956.]
- [22] Schindler D. Managing nutrient mobilization and eutrophication//Levin SA, Carpenter SR, Godfray HC *et al* eds. The Princeton guide to ecology. Princeton: Princeton University Press, 2012.
- [23] Johnson WE, Vallentyne JR. Rationale, background, and development of experimental lake studies in northwestern Ontario. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1971, **28**(2): 123-128. DOI: 10.1139/f71-026.
- [24] Schindler DW. Evolution of the experimental lakes project. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(3): 313-319. DOI: 10.1139/f80-044.
- [25] Schindler DW. Eutrophication and recovery in experimental lakes; Implications for lake management. *Science*, 1974, **184**(4139): 897-899. DOI: 10.1126/science.184.4139.897.
- [26] Wu JL, Gan L, Liu SX *et al.* Effect of restoration on the eutrophication and ecological status of Lake Yanglan (Hubei Province): Assessment based on macroinvertebrates. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1547-1558. DOI: 10.18307/2019.0616. [吴家乐, 甘磊, 刘素霞等. 修复对湖北洋澜湖富营养化与生态状况的影响: 基于大型无脊椎底栖动物的评价. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1547-1558.]
- [27] Lürling M, Mackay E, Reitzel K *et al.* Editorial—A critical perspective on geo-engineering for eutrophication management in lakes. *Water Research*, 2016, **97**: 1-10.
- [28] Liu ZW, Hu JR, Zhong P *et al.* Successful restoration of a tropical shallow eutrophic lake; Strong bottom-up but weak top-down effects recorded. *Water Research*, 2018, **146**: 88-97. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.007.
- [29] Stokstad E. Canada's experimental lakes. *Science*, 2008, **322**(5906): 1316-1319. DOI: 10.1126/science.322.5906.1316.
- [30] Minshall GW. Bringing biology back into water quality assessments//The Committee on Inland Aquatic Ecosystems, Water Science and Technology ed. Freshwater ecosystems: revitalizing educational programs in limnology. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996: 289-324.
- [31] European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 of establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, 2000: 1-72.
- [32] Reyjol Y, Argillier C, Bonne W *et al.* Assessing the ecological status in the context of the European Water Framework Directive; Where do we go now? *Science of the Total Environment*, 2014, **497**: 332-344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.119.
- [33] Shi CX. Thirty years in limnology in People's Republic of China. *Acta Geographica Sinica*, 1979, **46**(3): 213-223. [施成熙. 湖泊科学研究三十年与展望. 地理学报, 1979, **46**(3): 213-223.]
- [34] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ed. Fuxian Lake. Beijing: Ocean Press, 1990. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990.]
- [35] Pu PM, Tu QY, Wang SM. Research progress of limnology in china. *J Lake Sci*, 1989, **1**(1): 1-11. DOI: 10.18307/1989.0101. [濮培民, 屠清瑛, 王苏民. 中国湖泊学研究进展. 湖泊科学, 1989, **1**(1): 1-11.]
- [36] Shen DJ, Chen CY. Retrospect of water resources utilization and their rational use. *Resources Science*, 1995, (3): 39-44. [沈大军, 陈传友. 水资源利用历史回顾及水资源合理利用. 自然资源, 1995, (3): 39-44.]
- [37] Zhang LP, Xia J, Hu ZF. Situation and problem analysis of water resource security in China. *Resources and Environment in*

- the Yangtze Basin*, 2009, **18**(2): 116-120. [张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(2): 116-120.]
- [38] Carpenter SR, Stanley EH, Vander Zanden MJ. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environment and Resources*, 2011, **36**: 75-99.
- [39] Shen J *et al* ed. Limnology. Beijing: Higher Education Press, 2020. [沈吉等. 湖泊学. 北京: 高等教育出版社, 2020.]
- [40] Vaughan IP, Diamond M, Gurnell AM *et al*. Integrating ecology with hydromorphology: A priority for river science and management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2009, **19**(1): 113-125. DOI: 10.1002/aqc.895.
- [41] Wang C, Zheng SS, Wang PF *et al*. Interactions between vegetation, water flow and sediment transport: A review. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, **27**(1): 24-37. DOI: 10.1016/s1001-6058(15)60453-x.
- [42] Liu ZW, Zhang XF, Chen FZ *et al*. The responses of the benthic-pelagic coupling to eutrophication and regime shifts in shallow lakes; Implication for lake restoration. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2020.0101. [刘正文, 张修峰, 陈非洲等. 浅水湖泊底栖——敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理: 对湖泊修复的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 1-10.]
- [43] Moss B, Jeppesen E, Søndergaard M *et al*. Nitrogen, macrophytes, shallow lakes and nutrient limitation: Resolution of a current controversy? *Hydrobiologia*, 2013, **710**(1): 3-21. DOI: 10.1007/s10750-012-1033-0.
- [44] Dodds W, Smith V. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters*, 2016, **6**(2): 155-164. DOI: 10.5268/iw-6.2.909.
- [45] Paerl HW, Hall NS, Calandrino ES. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(10): 1739-1745. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.02.001.
- [46] Solomon CT, Jones SE, Weidel BC *et al*. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: Current knowledge and future challenges. *Ecosystems*, 2015, **18**(3): 376-389. DOI: 10.1007/s10021-015-9848-y.
- [47] Shang P, Lu YH, Du YX *et al*. Climatic and watershed controls of dissolved organic matter variation in streams across a gradient of agricultural land use. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 1442-1453. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.322.
- [48] Thompson RM, Hemberg M, Starzomski BM *et al*. Trophic levels and trophic tangles: The prevalence of omnivory in real food webs. *Ecology*, 2007, **88**(3): 612-617. DOI: 10.1890/05-1454.
- [49] Zhang XF, Liu ZW, Jeppesen E *et al*. Effects of benthic-feeding common carp and filter-feeding silver carp on benthic-pelagic coupling: Implications for shallow lake management. *Ecological Engineering*, 2016, **88**: 256-264. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.039.
- [50] Zhang XF, Mei XY, Gulati RD. Effects of omnivorous tilapia on water turbidity and primary production dynamics in shallow lakes: Implications for ecosystem management. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2017, **27**(1): 245-254. DOI: 10.1007/s11160-016-9458-6.
- [51] He H, Jin H, Jeppesen E *et al*. Fish-mediated plankton responses to increased temperature in subtropical aquatic mesocosm ecosystems: Implications for lake management. *Water Research*, 2018, **144**(2018): 304-311.
- [52] Zeng HY, Zhong P, Zhao XF *et al*. Response of metazoan zooplankton communities to ecological restoration in a tropical shallow lake. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 170-177. DOI: 10.18307/2016.0120. [曾海逸, 钟萍, 赵雪枫等. 热带浅水湖泊后生浮游动物群落结构对生态修复的响应. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 170-177.]
- [53] Welti N, Striebel M, Ulseth AJ *et al*. Bridging food webs, ecosystem metabolism, and biogeochemistry using ecological stoichiometry theory. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**: 1298. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01298.
- [54] Chen GZ, Lin XT, Chen P. Recent progress in the invasion ecology of mosquito fish (*Gambusia* spp.). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(9): 4476-4485. [陈国柱, 林小涛, 陈佩. 食蚊鱼 (*Gambusia* spp.) 入侵生态学研究进展. 生态学报, 2008, **28**(9): 4476-4485.]
- [55] Yang YY, Wang QS. Status and progress of malaria prevention. *Hainan Medical Journal*, 2014, **25**(4): 547-549. [杨永焱, 王秋生. 疟疾预防的现状与进展. 海南医学, 2014, **25**(4): 547-549.]
- [56] Guo ZQ. Review of factors influencing transmission risk of dengue fever. *Practical Preventive Medicine*, 2018, **25**(11): 1407-1409. [郭泽强. 登革热传播风险的影响因素研究综述. 实用预防医学, 2018, **25**(11): 1407-1409.]
- [57] Johnson PTJ, Townsend AR, Cleveland CC *et al*. Linking environmental nutrient enrichment and disease emergence in humans and wildlife. *Ecological Applications*, 2010, **20**(1): 16-29. DOI: 10.1890/08-0633.1.