

湖泊及流域科学研究进展与展望^{***}

1 湖泊及流域科学学科发展回顾与进展

1.1 湖泊及流域科学发展的历程

自古以来,人类择水而居,人类文明大多起源于江湖流域,使之成为全球人口、经济与城市密集区。然而,人类长期的生息运作,使湖泊及流域系统不断发生着巨大变化,导致资源结构性短缺矛盾逐渐加剧,环境污染加重、生态日趋脆弱,灾害频发损失剧增,湖泊及流域上中下游之间、部门之间的利益冲突和矛盾不断尖锐等,成为区域人-地关系最为紧张和复杂的地理单元。以湖泊及其流域作为研究对象,研究湖泊-流域相互作用,有助于在微观尺度上揭示水陆界面过程和物质输移规律,在中观尺度上理解水陆生态系统的结构与功能演变过程与机制,在宏观尺度上定量区分自然演变、人类活动和全球变化等对湖泊-流域系统的影响。因此,湖泊及流域科学的发展一直得到国际科学界的重视,同时,由于与人类生存与发展紧密相连,也受到政府与社会的高度关注。

湖泊科学的发展已有 100 余年的历史,19 世纪末 F. A. Forel 关于 Geneva 湖系列专著出版,标志着湖泊学(湖沼学)正式成为一门独立的、涵盖地理学、地质学、气象气候学、物理学、化学和生物学等多学科交叉的综合性学科。Naumann & Thienemann^[1]在 1922 年建议成立国际理论与应用湖沼学会(SIL)时指出,湖泊学是关于内陆水的科学,包括影响内陆水的各个方面,由两大部分组成,即水文地理学(Hydrography)和水生生物学(Hydrobiology)。

湖泊学初期的发展受到了传统的植物学和动物学的影响。20 世纪上半叶,通过对不同地理区域湖泊的研究,尤其是对热带湖泊的研究,发现了湖泊的半混合现象,以及湖底层溶解氧衰减厌氧和二氧化碳富集对湖上层生产量的指示作用,湖泊学家认识到湖泊营养状况和生产量不是静止的,而是处于一种动态平衡状态。只了解生物量的变化是不够的,还必须测定单位时间的转换速率。由此,湖泊学开始了从研究湖泊结构到研究湖泊功能的转变^[2]。与此同时,研究方法与分析技术的进步,诸如同位素示踪技术在湖泊学中的应用等,大大促进了湖泊功能定量化研究,也促进了这一转变。

中国湖泊科学的发展至今已有近 50 年的历史。1957 年在著名的气象和地理学家竺可桢教

* 为了进一步明确湖泊及流域科学学科发展方向,研讨“十五”及 2010 年湖泊及流域科学优先资助领域及重点研究方向,国家自然科学基金委员会地球科学部联合中国科学院南京地理与湖泊研究所于 2002 年 3 月 26-28 日在南京召开“湖泊及流域科学学科发展与优先领域学术研讨会”。来自中国科学院、水利部、南京大学、东南大学、河海大学、华东师范大学、浙江大学等 15 个单位的专家、学者 60 余人参加了会议。本文为会议秘书组最后上呈国家自然科学基金委员会的正式报告(有删节)——编者注。

** 《湖泊及流域学科发展战略研究》秘书组组长:宋长青,副组长:杨桂山、冷疏影,成员(以姓氏拼音为序)陈伟民、陈雯、陈振楼、范成新、谷孝鸿、胡维平、黄文钰、姜加虎、李恒鹏、刘正文、潘根兴、王苏民、吴敬禄、吴瑞金、徐中民、薛滨、羊向东、张恩楼。

授倡导与主持下召开了全国首次湖泊科研工作会议,明确提出了填补中国湖泊科学研究空白的任务。早期有关中国湖泊的研究重点主要集中在湖泊综合调查、摸清中国湖泊家底方面,通过四十余年的调查,相继出版了《太湖湖泊综合调查报告》、《中国湖泊概论》、《中国湖泊资源》、《中国湖泊志》,建立了“中国湖泊数据库”和“中国湖泊编码”等。60年代中期至90年代初,针对当时国家需求,将湖泊科学研究的重点转移到湖泊资源的开发利用方面,在湖盆油气资源勘探与开发、湖泊水资源调配、湖泊滩地围垦、银鱼移植、水体农业与大水面网围养鱼等生物资源开发利用方面取得了丰硕的成果。近10余年来,随着经济快速发展,湖泊生态环境不断恶化,尤其是湖泊富营养化问题日趋严重。湖泊科学关注的重点又转移到研究湖泊生态环境退化和修复的理论与实践研究方面,在入湖污染物调查与控制、湖泊水环境变化规律、湖泊富营养化形成机理、富营养化湖泊藻华控制与治理、湖泊退化生态系统修复、湖泊沉积与全球变化等方面开展了大量研究工作,积累了大量的数据和资料,大大丰富了湖泊科学的理论。

流域指一个湖泊(或河流)的集水区域,是以水为媒体,由人和自然共同构成包括社会、经济、资源、环境等诸要素在内的复合系统,系统内部湖泊-河流-流域之间各种事件的发生和变化存在着共生和因果联系,因此只有以湖泊及流域系统为整体单元进行资源开发、环境整治和社会经济发展的统一规划和综合管理,才能从流域内部不同区域的物流、能流和信息流出发,充分尊重自然规律,达到人与自然的协调,确保资源与环境的可持续利用。传统的以行政区为单元、人为割裂湖泊与流域或流域各区段之间自然联系的研究思路与方法,已越来越难适应当今地学研究强调自然与人文综合集成、强调定量微观机理的发展趋向。

长期以来,湖泊与流域研究是截然分开的。早期 F. A. Forbes 强调湖泊生态系统的相对封闭性,一定程度上阻碍了人们对湖泊与其流域关系的认识。当时流域研究主要针对水土流失、山洪、滑坡、泥石流和洪涝灾害等问题展开的。1915年,美国林业局在犹他州布设了第一个流域性水土流失监测小区,1944年,美国通过《公共法》,规定对美国11条大河(湖)流域进行防洪、侵蚀及泥沙控制规划。1923年,前苏联奥尔诺夫斯克州也成立了世界上第一个土壤保持试验站——诺沃西里试验站,开展流域土壤侵蚀观测和定量化分析。早期欧洲的流域研究也是与防治山洪、泥石流、滑坡等自然灾害联系在一起进行的。湖泊与流域之间的相互作用、尤其是湖泊与流域生态环境退化之间不可分割的联系并没有受到足够的重视。

至20世纪50年代,以流域为单元进行资源和环境综合研究和管理的的重要性逐渐得到越来越多学者和管理者的重视。纷纷开展了以流域水资源系统优化调度和利用为目标的流域综合整治和资源开发研究。开始将流域作为一个系统,对流域防洪、水资源供应、水环境治理和保护、河湖整治,以及航运、旅游和发电等进行统一规划和管理。

近几年来,随着流域经济快速发展和人口剧增,人类对流域资源利用和环境破坏的强度不断加大,人口、资源、环境与发展的矛盾日趋尖锐,国内外学者和政府管理者普遍认识到以流域为单元进行流域综合管理是实现流域可持续发展的有效途径。使得以流域资源可持续利用、生态环境建设和社会经济可持续发展为目标的流域综合管理研究在一些发达国家(如澳大利亚、英国、荷兰、美国等)广泛兴起,成为区域地理学新的学科生长点。英国学者 Gardiner 于1993年最先提出以流域可持续发展为目标的流域综合管理,英国国家河流管理局(NRA)于1995年发表了 Thames 河流域21世纪日程与持续发展战略,对水资源、水质、洪水、自然保护、休闲地、航运等进行了以可持续发展为目标的对策流域规划。90年代期间,美国环境保护署强

调流域的整体治理,地下水、地表水、湿地、大气、生态系统统筹考虑规划、设计、实施和保护。政府与科学家的共同关注大大促进了流域科学的发展,不仅在流域水文、流域生态、流域经济、数字流域等分支领域迅速拓展,而且形成了以中小尺度流域过程的定量化模拟和流域可持续发展为目标的流域综合管理的新学科重点。

如上所述,作为相对独立的学科,湖泊及流域科学从理论上和实践上都得到了迅速发展与完善。同时,随着学科的发展,面对国民经济建设中出现的一系列资源环境问题,人们逐渐认识到将湖泊与流域有机联系起来,开展湖泊-河流-流域相互作用研究的必要性和紧迫性。在国际上,1969年 Vollenweider 从流域的范围研究了氮、磷对富营养的贡献,开始关注湖泊与其流域的联系。Hasler^[3]主编的《陆地和水系统的耦合作用》,以及 Oldfield^[4]等人的工作更强调了湖泊-流域系统作为一个生态系统进行研究的重要性,从此越来越多的湖沼学家开始从流域的角度研究湖泊。在国内,尤其是 20 世纪 80 年代以来,非点源污染造成的河湖水体富营养化问题日趋严重,成为水环境污染的突出表现形式。日益严重的水环境恶化对国计民生造成的难以估量的损失和持久潜在的威胁,使学术界及各级政府认识到,就湖论湖、就水治水是事倍功半的非有效之途,是没有出路的。流域是湖泊之源,湖泊是流域之汇,湖泊与流域是一个自然与社会密切相关的互为反馈的动态变化系统。目前,以湖泊及流域生态环境建设和保护为目标的湖泊-流域系统营养物质产生、输移、转化与控制研究正在成为湖泊及流域科学研究的热点。在 1998 年中国科学院资源环境领域学科发展研讨会上,包括多名院士在内的与会专家一致建议将流域管理学作为资源环境领域的两大新学科生长点加以重点发展。

1.2 湖泊及流域科学分支学科发展

湖泊及流域科学发展历史虽不很久远,但由于受到生产实践需求的强烈推动,学科理论体系发展很快,已逐步形成了较为完整的湖泊物理、湖泊化学、湖泊生物、湖泊沉积、湖泊-流域地表过程、湖泊-流域综合管理等分支研究领域。

1.2.1 湖泊物理学

湖泊物理是湖泊学的基础,主要研究对象是湖泊及集水域的各种物理现象和物理过程。由于湖泊的空间尺度及其对地球表层系统的影响远小于海洋,其物理特性受其所在的地理位置、气候条件、湖盆形态影响又较大。因此,与海洋物理学相比,湖泊物理研究起步较晚,受重视程度也很不够。加之缺乏全球性的研究计划,仅有零星的不同地理气候区的对比研究,在一定程度上影响了湖泊物理学的学科发展。迄今为止,尚缺乏系统、全面、综合性的湖泊物理学论著。

早期湖泊物理学研究的重点为湖泊温热变化。因深水湖泊有垂直温差、温跃层及相关动力学现象,深水湖泊研究受到了更多的关注。随着研究的深入,湖泊水动力学和物质输移研究逐渐得到了加强。特别 70 年代以来的计算机科学技术发展,极大地推动了数值模拟方法在湖泊水动力学研究中的应用。水动力学模型已由一维、二维发展至三维,由揭示温、盐、及水动力宏观分布、变化特征向进一步揭示微系统结构方向发展。

我国湖泊物理方面研究起步于 20 世纪 50 年代。早期研究重点集中在湖泊水文状况调查、湖泊水沙平衡、水文模型、湖泊光学、热学和水动力学等。从云贵高原湖泊水动力学、湖泊热分层与湖体双层环流的观测研究,到蒙新内陆地区湖泊水资源调查、水量平衡计算和干旱半干旱地区湖泊萎缩、水位下降原因分析,从青藏高原湖泊水文补给与水质关系研究,到长江中下游湖泊洪水规律探讨,从深水湖泊的基本物理结构的揭示到大型浅水湖泊水体热力学、动力学及

其数值模拟等,进行了大量基础性的观测与研究,为我国物理湖泊学的发展奠定了基础。

80年代以来,随着人类活动干预湖泊强度增加,湖泊水环境恶化问题越来越为社会界特别是学术界所关注,湖泊物理因子变化对湖泊生态系统结构、功能的影响成为湖泊物理学研究的新课题。近年来湖泊物理学的研究重点也更多地转移到与湖泊环境研究紧密结合,由单一学科向多学科联合相互渗透的研究方向发展,逐步确立了湖泊物理学尤其是水动力学在湖泊生态环境研究中的重要地位。

1.2.2 湖泊化学 湖泊化学重点研究物质在湖泊环境介质(水、沉积物、气及生物)中的赋存、化学特性、行为及其效应和化学反应机理等,是湖泊科学的重要分支之一。

湖泊中的污染物、营养物、信息物对环境和生态的冲击、影响与效应,无不与湖泊的环境化学过程有关。湖泊化学的基础和应用基础研究是揭示湖泊演化、湖泊水污染成因机制、湖泊污染治理与生态修复技术研究的关键。研究重点包括化学物质在湖泊环境介质中的赋存形态以及这些物质的来源与化学行为;化学物质对湖泊环境(生态系统)产生效应的途径、机制、风险及阻断机理。近年来,湖泊化学向着痕量和超痕量、形态、价态、结合态分析化学、胶体化学、降水化学、沉积物化学、污染生态化学、生物地球化学、污染控制和预防化学等领域发展。

我国湖泊化学的发展大致可分为三个阶段:20世纪50~60年代,为普查和资料积累阶段,进行了大量湖泊水、沉积物的化学分析和含量比较研究。70~80年代,在获取大量第一手资料的基础上,进行了湖泊水化学类型分区研究,同时也开展了湖泊水体有机污染和重金属污染现状、湖泊营养状况、污染物出入湖平衡及环境容量等定量研究和评价。90年代起,湖泊化学开始更加注重研究化学污染物引起的湖泊环境恶化问题,如湖泊富营养化、酸化、咸化等,涉及其营养物在湖泊水、沉积物中的行为、富营养化对湖泊生态系统的胁迫作用,以及物质在水、沉积物(悬浮物)、生物体等介质间和界面上的形态转化及其环境效应,并开始重视湖泊过程和实验模拟研究。

1.2.3 湖泊生物学 从湖沼学(Limnology)兴起的时候,湖泊生物学就是湖沼学的重要组成部分。早期的湖泊生物学研究受传统植物学、动物学的影响较大,十九世纪末和二十世纪初的工作多为水生生物分类学研究,如浮游植物、浮游动物、底栖动物、鱼类等的分类与区系组成。湖泊环境因子的定量研究的出现,大大促进了湖泊生物学的发展。如 Juday^[4]根据溶解氧含量对湖泊进行了分类,随后 Thieneman^[4](1913~1915年)发现不同类型湖泊的底栖动物区系是与湖泊溶解氧密切相关的,这些工作使人们更加认识到生物与环境的相互关系,促进了水生生态学的研究。

在大量湖泊生物观察、描述、分类和数据积累的基础上,比较湖沼学方法得到了发展,湖泊生物学家把单项生物数据进行比较、归纳,以获得湖泊整体特征,并对湖泊进行分类,真正开始把湖泊作为一个生态系统进行研究。如 Thieneman^[4]主要利用湖泊底栖动物对湖泊营养水平进行分类,后来引入了其他参数,并将初级生产力作为湖泊营养水平分类的主要指标。

现代湖泊生物学的研究重点转移到湖泊生态学,内容几乎包括所有生态学的基础理论与应用研究。随着社会经济的发展,自然资源的枯竭和环境的恶化,湖泊生态学和其他生态学分支一样,面临着前所未有的挑战,研究热点包括^[5]:1)生态恢复,包括生态恢复的基本原则、评价和预测生态恢复效果的方法;2)生物多样性保护,包括揭示生物多样性与生态系统功能之间的关系、预测各种保护措施对生物多样性的影响等;3)生态系统对环境变化包括全球变化的响

应与预测 4) 基础生态学的研究, 基础研究将有助于发现和解决未来可能出现的问题; 5) 分子生物学方法在湖泊生物群落演替和生态修复研究中的应用。

1.2.4 湖泊沉积学 湖泊沉积学研究 包括两方面的内涵: 一是对湖泊现代沉积过程的研究, 包括沉积动力学、沉积过程与环境因子的关系、时空变化规律等; 二是通过湖泊沉积物赋存信息的提取研究不同尺度气候、环境变化历史与区域差异, 发展古湖沼学理论。

湖泊沉积学的最早研究始于 19 世纪 80 年代, Gilbert 对贝利维尔湖的研究和 Forel 对日内瓦湖和康斯坦斯湖的研究。至 20 世纪中期, 在重视历史时期灾害性事件引起的再沉积作用的同时, 开始采集湖泊岩芯, 根据分析结果反演演化历史和营养水平。随着利维斯《古湖泊学导论》的出版, 强调古今结合研究的重要性, 标志着多学科研究湖泊新阶段的开始。由于人类对石油、煤、泥炭、盐类矿产等的需求, 作为这些矿产资源的重要蕴藏体的湖泊沉积物研究受到极大的关注。20 世纪七、八十年代是湖泊沉积学蓬勃发展时期, 相继在湖泊重力流沉积、蒸发岩沉积、湖泊三角洲与扇三角洲沉积、年层沉积、淡水碳酸盐沉积等的沉积类型、形成动力机制、沉积模式方面取得重大进展, 建立了湖泊沉积学的理论体系, 为后来发展的地震地层学和层序地层学奠定了扎实的基础。

20 世纪 90 年代以来, 随着过去全球变化研究的深入和扩展, 继深海钻探和极地冰芯研究取得突破之后, 愈来愈多的科学家开始关注陆地环境的变化, 国际大陆钻探计划(ICDP)兴起。由于湖泊具有沉积连续、分辨率高、信息丰富、地理覆盖面广、对气候变化响应敏感等特点, 已成为不同时间尺度过去全球变化研究的重要领域之一。近年来, 围绕以气候变率与可预测性以及分辨人类活动影响的目标, 国际研究项目不断涌现, 以精确定年和环境要素定量化为前提的短时间尺度气候环境研究迅速成为热点。从湖泊 - 流域现代沉积过程着手, 揭示湖泊 - 流域生态环境变化过程, 定量评估人类活动的影响成为湖泊沉积研究的新的方向。

1.2.5 湖泊 - 流域地表过程 自 70 年代以来, 美、英、日等主要工业国先后建立了全国性环境管理和科研机构, 开展包括湖泊和流域地表过程在内的污染物质输移与模拟研究。如美国、加拿大在五大淡水湖流域的环境研究(70 年代), 联合国经济合作与发展组织(OECD)在全球组织和协调的内陆水体环境研究(80 年代)等。主要研究领域包括主要生源要素(如 C、N、P 等)在流域地表的迁移转化规律, 污染物质输移过程及环境灾害研究等, 如利用美国水土流失方程搭载的物质迁移模式、利用放射性同位素研究的流域水土侵蚀模式和水土界面物质迁移过程研究, 湖泊(如 Jørgensen S. E. 在 70 年代的湖泊生态模型方程)和河道(如 S - P 方程、Thomas、Thomann、Dobbins 等模式)中的迁移过程研究, 以及近期日本相崎守弘教授利用 GIS 对流域内物质输移的研究等。

国内环境科学研究始于 70 年代后期, 主要集中在环境和环境灾害的调查评价、模拟、规划和过程的研究, 在短短的二、三十年里, 取得了大量成果, 特别是在流域及湖泊社会经济发展与污染物输出、流域农田土地物质输移过程、河流及河网物质输移过程、湖泊内物质循环及水 - 土界面物质输移过程、湖泊水生生物间物质循环过程等方面, 迅速跟上了国际研究步伐。

1.2.6 湖泊 - 流域综合管理学 欧美等一些发达国家, 从 20 世纪 30 年代开始, 就注重对一些著名的河流(如罗纳河、莱茵河、田纳西河等)从全流域角度进行水资源利用、航道整治、水污染控制等方面的综合研究和统一管理, 并取得显著成效。1992 年都柏林(Dublin)“国际水与环境大会”及里约热内卢(Rio de Janeiro)“联合国环境与发展大会”均强调“加强流域的规划与管理”

工作,以便控制和遏止环境恶化”,从而使以流域为单元,进行流域综合管理(CIM)研究逐渐成为区域地理学研究的热点。

“流域管理”一词最早出现于 50 年代,源于水资源系统优化和调度,以后随着流域经济快速发展和人口剧增,人类对流域资源利用和环境破坏的强度不断加大,地理学家逐渐开始将这一概念的内涵加以延拓和发展。湖泊-流域综合管理,既不同于传统意义上的水资源调度管理,更不是行政意义上的政府决策管理,而是以湖泊-流域为单元,针对流域人口、资源、环境与发展(PRED)问题,重点研究湖泊-流域人地关系复杂过程、时空分异规律与调控机理,为流域实现可持续发展目标提供理论基础和科学依据的科学,是地理学、经济学、管理学以及资源科学、生态科学、环境科学、信息科学和系统科学等多学科的交叉融合。

尽管从流域宏观角度进行资源管理的观念已为人们接受和熟识,但科学家们数十年来所极力倡导的真正意义上的流域管理作为一个学科发展却未能实现。从 21 世纪开始,针对一些紧急事件的发生,流域综合管理这个概念得以强调。20 世纪 50 年代的研究方法和策略需要重新回顾,重新评估和修订,强调在现代条件下,围绕解决当前紧迫的食物保障和环境质量等一系列问题,建立不同目标的流域管理模型是当前流域管理科学面临的挑战。

2 湖泊及流域科学学科发展面临的挑战

湖泊是内陆水体的重要组成部分,具有供水、旅游、渔业、水利、航运、污染净化和调节生态等多种利用价值和功能。河湖流域作为人类最重要的聚居和活动场所,随着人类活动的加剧,各种资源与环境问题日渐突出,并且由于所处地域自然环境条件的不同和人类活动强度的差异,呈现明显的区域分异,使得湖泊及流域面临的问题十分庞杂,已经危及流域社会经济可持续发展和人们生活安定。因此,湖泊及流域科学的发展不仅面临着来自学科自身的挑战,而且也面临着如何解决生产实际紧迫问题的压力。

2.1 国家可持续发展战略需求对湖泊及流域科学提出的挑战

如何解决国家经济高速发展过程中出现的一系列湖泊及流域资源环境问题是本学科面临的最严峻的挑战。

2.1.1 湖泊过度开发 湖泊作为地球表面陆地水圈的重要组成部分,在长期的发育和演化过程中,形成了具有完整结构的生态系统,在维系自身生态平衡的同时,也维系了区域的生态平衡,从而显现了其特有的生态服务功能和价值。但由于受认识水平的制约,人类在开发、利用湖泊过程中,往往仅注重其是资源的载体,而忽视其作为功能载体的生态价值。

我国东部平原地区湖泊湿地的过度围垦,甚至是竭泽而用,不仅丧失了约 14000km² 的湖泊面积,相当于五大淡水湖面积总和,使这些湖泊永久失去了蓄纳、调节水、沙的功能,造成洪涝灾害频发,而且导致了湖泊及其湿地系统结构和生态稳定机制的严重破坏,并因调节能力的削弱甚至丧失,加速水环境恶化等生态失衡的严重后果或环境灾难。

湖泊渔业是人类需求蛋白质来源的重要途径,包括湖泊的人工放流养殖和网围养殖等类型。大水面网围养殖是我国淡水渔业发展的一个重要支撑点,80 年代以来,取得了极其显著的经济效益和社会效益。然而,由于缺乏科学的引导、系统全面的规划和局部利益驱动,网围养殖的盲目发展对湖泊环境和水利、航运等产生了一定的影响。一方面阻塞航道造成水上交通不畅影响泄洪和供水,另一方面,导致低质水生植被的大量生长而不被利用,加速了湖泊的沼泽化。

同时由于大规模网围养殖过量投喂饲料,又导致湖泊中营养盐的增加、浮游藻类的增多、浮游动物、优质水生植被和大型贝类的减少、表层沉积物污染加重、生物群落演替激烈,渔业产品自身的品质下降,湖泊的沼泽化和富营养化加剧。此外,湖泊人工放流和捕捞过度,造成了湖泊天然渔业资源的退化和再生产能力的减弱,生物多样性降低;另一方面,湖泊捕捞渔业过度,渔业自然再生能力减弱,渔业品质退化,生态位改变、湖泊生态系统失衡。

2.1.2 湖泊环境恶化 我国幅员辽阔,由于自然环境条件和人类活动方式与强度不同,不同区域湖泊,其环境问题呈现不同的特点,东部地区主要以湖泊污染和富营养化问题为主;中部湖泊主要以淤积、沼泽化及相关的洪水灾害问题最为突出,西部湖泊则以萎缩、咸化和干涸及其引发的绿洲消失、土地荒漠化问题为关注的焦点。

东部地区湖泊(主要指分布于长江及淮河中下游、黄河及海河下游和大运河沿岸的大小湖泊)面积占我国大于 1km^2 的淡水湖泊的总面积的 71%,几乎均为浅水湖泊。自然状况下湖泊向富营养化演变的过程是极为缓慢的,而强烈的人类活动则大大加剧了这一进程。东部地区人口密度大、经济发展快、污染物大多超环境容量排放,加之环境保护措施滞后,使得湖泊及其流域生态环境迅速恶化。该地区的水环境问题不仅有西方国家水污染出现的以 COD、重金属为主的有机污染和重金属污染特征,更有西方国家主要由氮、磷引发水体富营养化的第二阶段污染特点,且后者发展趋势相当猛烈。1991 年仅有约 51% 的湖泊趋于富营养化,1996 年 26 个国家控湖泊中 85% 总体处于富营养化状态,城郊和城市湖泊 100% 呈富营养或重富营养。如太湖、巢湖、白洋淀、武汉东湖、杭州西湖等等已明显出现富营养化,甚至重富营养化状态,有些湖泊在夏秋季常发生藻类水华暴发,严重影响饮用水供给,给社会、经济和人民身体健康造成极大危害。

中部地区湖泊(主要集中在长江中游的沿江地区)的发育、演化与长江息息相关,其中目前尚通江的湖泊(大部分已建闸封堵)由于与长江进行水力交换的能力减弱,大量的泥沙沉积于入湖河流三角洲,如洞庭湖多年平均湖盆泥沙淤积量近 $1 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,导致了湖泊迅速萎缩,湖泊的沼泽化过程明显加剧。湖泊泥沙的严重淤积,不但削弱了湖泊调节洪水径流的能力,加剧洪水威胁程度,而且诱发了湖泊湿地大规模垦殖活动的发生,破坏了湖泊湿地系统的生态结构,导致区域水环境恶化。

西部干旱半干旱地区面临的主要生态环境问题是水资源短缺。我国干旱、半干旱湖泊,由于湖泊的水质状况,难以直接作为饮用水源、甚至灌溉水源进行利用,迫于水资源短缺的压力,传统的利用方式是将进入湖泊的水量,通过上游建库或河流筑坝的形式,拦截径流于集水域以利于农灌等,与暖干化的气候背景相叠加,从而加剧了湖泊退缩、咸化,甚至消亡,诱发了诸如绿洲消失、生物多样性消亡、滨湖植被退化或荒漠化等现象,对区域生态安全构成了严重威胁。

2.1.3 流域资源过度开发与生态失衡 水作为流域上、中、下游各自然与人文要素之间联系的媒介,使流域系统不仅在水环境、水灾害和水资源等方面相互关联、相互影响,而且土地利用、环境整治等方面也具有极大的相关性,形成不可分割的有机整体。庞大的水系蕴含着巨大的生物、能量等生产力,具有强大的供水、航运、繁衍水产、生态维护和旅游景观等功能。这些资源的共享和维护已成为流域水资源开发利用的焦点和矛盾所在,导致水资源利用相互矛盾、摩擦不断;由于长期以来缺乏流域的综合有效管理,存在着条块分割和地方(部门)保护主义倾向,常常导致在开发利用共有资源上出现矛盾,其结果是导致这些资源的不断流失与恶化,地区之间

争夺资源方面的矛盾更为突出,特别是水具有相通性,上游河道整治和减灾工程不仅影响当地,而且也影响下游;上游土地利用中流失的泥沙、N、P等营养物沿河道迁移,造成下游河湖淤积和水体富营养化;上游工业发展形成的污染物对下游的二次污染,成为突出的区域环境矛盾,加剧了湖泊资源环境问题。

2.1.4 流域缺乏有效的综合管理,地区与行业间的矛盾突出 流域系统不仅在水环境、水资源等方面相互关联、相互影响,而且在经济、社会、文化等方面也具有极大的相关性,形成不可分割的有机整体。流域内任一自然与社会经济要素的变化或某一区段的局部性调整均将不可避免对整个流域产生重要影响。经济生存空间的相互挤压和竞争的矛盾,导致流域内部地区之间以及行业之间的冲突不断。流域内各地区为了地区或部门自身的局部利益,使多数地区在博弈中出现逆向选择,忽略本身的资源优势和环境条件,盲目发展小而全的产业结构,造成不同地区之间产业结构的雷同和相互竞争,从而不利于整个流域可持续发展和湖泊资源环境问题的解决。

3 湖泊及流域科学自身发展面临的问题

3.1 研究对象的复杂性和不确定性

湖泊作为地球表面陆地水圈的重要组成部分,不仅自身水、气、生物、底泥相互作用、相互影响,构成完整复杂的生态系统,而且由于水的连通性,还深受流域物质流、能量流和信息流的影响。不仅如此,由于湖泊—流域大多人口稠密、经济发达,深受人类活动的强烈干扰,自然和人为的各种过程交织,不确定性大,极为复杂,因此难以把握其发生发展的客观规律,进而科学、定量地加以表述和刻划。加之,湖泊—流域区域性强,不同区域间自然与人文背景的巨大差异,造成演变规律各异、面临的问题不同。所有这些特点都在一定程度上影响了湖泊—流域科学地迅速发展。

3.2 基础性工作薄弱和基础数据积累不足

基础性工作与基础数据是学科发展的基石,获取基础数据一直为各学科开展研究首要任务。与海洋、土壤、森林等研究对象相比,湖泊空间尺度相对较小,因此一直未受到应有的重视。在我国,有关湖泊野外调查和监测台站与机构很少,缺乏湖泊水体生态环境监测网。目前正规不间断定位观测湖泊生态系统的野外研究站仅有太湖和东湖。其他湖泊的定位监测一直处于间断、不连续状况。有些湖泊到目前为止,基础数据还是一片空白。

随着人们的认识不断提高,湖泊在经济社会发展中地位与作用越来越高,人们关注湖泊力度加大,但是由于部门利益和条块分割等不利因素,多家层次不同、目标不同的单位参与了湖泊监测,造成湖泊基础资料分散,缺乏统一规范。由于湖泊各特征参数时空变率大,点位差异和采样时间差异,对监测结果影响很大,再加上各家监测要求不一致,监测方法不同,观测实验手段与仪器设备落后,导致数据缺乏时间与空间代表性,缺乏统一规范,可比性差,利用这些资料很难得到科学的结论。

3.3 研究思路与方法急需创新

长期以来,湖泊及流域研究深受地理、海洋和生物等相关学科的影响,一直沿袭这些相关学科以经验描述和宏观分析为传统的传统研究思路与方法,加之基础数据缺乏和数据获取手段的落后等,研究中野外调查与宏观分析多、微观机理和过程研究少,对各种现象的定性分析多、

定量表述和实验研究少,由于缺乏系统的数据,对湖泊及流域格局变化与过程模拟的通用模型开发研究更少,且模型参数准确性与适用性差.与此同时,湖泊及流域研究大多缺乏系统、综合观点,往往只考虑单因子的作用,而忽视湖泊及流域作为一个相互联系、相互影响的整体,受多因子综合影响,导致湖泊及流域科学学科发展的理论与方法创新意识不够,不能适应生产实践日趋迫切的定量化、科学化的要求.

3.4 基础研究滞后

中国是一个多湖泊大国,湖泊的自然特征与地理分布深受地貌阶梯和季风气候的影响,形成了青藏高原、蒙新、云贵高原、东部平原和东北山地平原等五大湖群.20世纪50年代以前仅有少数湖泊的路线考察记录,资料极其零散.60年代至80年代,重点是对全国湖泊进行资源普查,而缺少对典型湖泊的物理、化学和生物过程的机理研究,也缺乏定位观察资料,没有认识到湖泊基础理论研究的重要性.在湖泊水资源、生物、土地资源高强度开发过程中,又忽视必要的生态、环境保护措施.目前,我国湖泊及流域科学发展面临的湖泊环境污染与富营养化、长江中下游湖区洪灾频发、西部湖周绿洲消亡与土地荒漠化、湖泊湿地生物多样性急剧减少等严重生态环境问题的挑战.由于对上述环境问题的过程与机理缺乏必要的基础研究,面对国家生态环境治理和建设的紧迫要求,难以满足生产实际的需要.

4 湖泊及流域科学学科前沿与优先领域

4.1 湖泊演化过程及人文影响因素的定量区分

4.1.1 湖泊生命周期与演化 研究湖泊在维系区域生态平衡方面的生态服务功能、揭示不同自然地理区域、不同类型湖泊演化阶段、未来趋势及其与全球气候变化的关系,定量确定维持湖泊良性生态的生态水位与水量,寻求全球变化背景下延缓湖泊生命对策,是湖泊及流域科学研究急需解决的重大科学问题,如不同区域、不同类型湖泊演化过程、动力学机制及对全球变化响应的差异;不同区域、不同类型湖泊生态水位、水量、水质量化及演化相位划分;湖泊加速消亡的生态环境效应与指标定量判识;延缓湖泊消亡的对策等等.

4.1.2 人与自然相互作用的湖泊响应 研究湖泊流域在人与自然相互作用下的物质(水、营养盐、泥沙、元素)迁移规律及湖泊环境响应过程是当前国际全球变化和流域可持续发展的基础科学问题.研究流域土地利用变化、城市化、工业化过程,定量模拟人类活动强烈干扰下湖泊水量变化与物质迁移、累积和生态退化过程与机理,研究并提出有效的调控技术与途径是当前湖泊-流域科学研究的国际前沿,如流域土地利用变化、城市化、工业化过程与阶段;人类活动标志系列建立及其对湖泊环境影响的定量区分;不同人类活动方式与强度对湖泊环境影响的机理;人与自然相互作用调控的技术与途径等等.

4.2 湖泊营养盐循环与生物地球化学过程

4.2.1 湖泊自然营养本底序列定量重建 围绕湖泊富营养化治理的国家目标和国际古湖沼学研究的热点,开展高分辨率湖泊沉积物营养代用指标的提取与分析,通过现代生物和生物地化指标与湖水主要营养盐指标(总磷、总氮等)函数关系研究,达到对过去湖水古营养水平定量重建的目的.为湖泊环境治理提供营养本底数据和生态修复参考目标,如湖泊沉积物中营养水平有效指标判识;湖泊营养本底与湖泊营养演化序列重建;湖泊内源与外源营养盐的判识途径和方法;湖泊营养演化的自然和人文驱动机制等等.

4.2.2 湖泊水动力对营养盐循环的影响 湖泊水动力对营养盐循环和生物生长影响是浅水湖泊现代过程研究的核心内容之一. 湖泊波浪可提高水体复氧的能力、加速底泥营养盐的释放、导致泥沙悬浮再次进入水体影响水体透明度, 并增强湖泊垂直混合. 湖流直接影响水体中营养盐、热量等的水平垂直输移过程及其时空分布特征. 除此之外, 湖泊水动力还可直接影响浮游植物、浮游动物及鱼的生长及优势种群的演替, 如湖泊波浪产生机理、特征及其对湖泊内源负荷影响; 湖流形成机制、垂直与水平微细结构及物质输移规律; 湖泊水动力过程对水体热力、光学特性的影响及机制; 湖泊水动力过程对湖泊生物生长及种群演替的影响等等.

4.2.3 营养盐循环的生化动力学机制 在生态系统水平上, 研究湖泊中各主要水生生物群落的结构组成、功能关系及其对湖泊营养盐循环、转化过程的作用, 耦合物理、化学的过程, 揭示湖泊生态系统中生物(尤其是微生物、酶)作用驱动下营养盐迁移、转化的途径、模式、动力学机制、调控途径及其潜在的环境效应, 确定生物驱动下生源要素再循环的有效负荷量及其对湖泊水环境演化的影响, 如湖泊营养盐来源、生物可利用性、内循环途径及速率测定; 湖泊生态系统各组分对营养盐循环、转化过程的作用; 湖泊生态系统对营养盐循环的响应与调控途径; 湖泊水体净化能力测定方法与环境容量估算等等.

4.2.4 湖泊沉积物-水界面地球化学过程与环境效应 湖泊沉积物-水界面是湖泊中最重要的界面之一, 包括湖泊近表层湖底沉积物及其间隙水和近界面上覆水体, 是其理化性质的突变区. 在浅水湖泊, 波浪扰动作用使界面常处于不稳定状态, 对于营养物在沉积物-水界面上的交换、形态转化、生物利用和界面的活化等都产生了极其重要的影响. 由于界面研究体系的复杂性, 应重点研究化学污染物在间隙水等微观介质中的迁移/降解机制, 悬浮颗粒物表面/界面结构和界面反应过程, 结合态的稳定性, 以及一些非平衡体系的理论及方法, 如湖泊微量元素的跨介质迁移与形态转化规律; 物质在湖泊沉积物-水界面迁移转化的热力学机制; 再悬浮对湖泊生源要素界面过程的影响及环境响应; 有机毒物在沉积物-水界面上的降解与生态效应等等.

4.3 湖泊-流域物质输移过程与机理

4.3.1 营养元素迁移的同位素示踪 随着湖泊及流域资源环境问题的突出, 环境同位素地球化学在解决流域侵蚀、营养盐迁移、湖泊水环境污染和生态功能失调等环境问题中发挥着越来越重要的作用. 从湖泊-流域系统的整体性和相互依存性的观点出发, 通过湖泊-流域系统同位素循环过程分析, 建立流域自然与人为驱动下湖泊营养演化过程的湖泊环境同位素模型, 识别不同人类活动方式与强度对湖泊营养状况的影响程度, 为湖泊-流域综合管理决策提供科学依据, 如流域入湖营养盐的同位素示踪; 湖泊生物地球化学过程的同位素示踪; 湖泊-流域系统环境同位素模型.

4.3.2 湖泊-流域物质输移、平衡与入湖通量 湖泊-流域物质输移过程研究是湖泊及流域科学最具潜力与应用前景的创新研究方向, 涉及沉积地貌学、水文物理学、环境化学、土壤学、生物生态学、经济学和流域管理学等众多学科. 研究重点包括水、污染物(包括营养物)、泥沙在水-陆界面的产生、汇集、输移和降解, 在水-沉积物界面上的转化、交换、吸附、富集, 以及入湖后的迁移、转化过程与机理. 目的是定量获得流域内自然和人类活动对物质产生的影响、物质的界面环境行为、河道及湖滨湿地的污染物净化机制与通量, 如流域主要污染物产生机制与来源定量识别; 污染物在流域河网中的输移、降解过程与模拟; 湖泊主要污染物的源汇与收支

平衡与水、沙、营养盐耦合模型 ;复杂平原水网流域物质平衡与通量等等。

4.4 湖泊及流域资源可持续利用与生态环境效应调控

4.4.1 湖泊湿地演变、生态功能与调控机理 湖泊的生态服务功能是由湖泊系统的生态结构所维持的,合理的生态结构是构成湖泊生态系统稳定性的基础。研究湖泊系统在维系其生态功能方面的结构特征,以及如何正确评估湖泊湿地系统的生态服务功能,湖泊系统自我调节的生态稳定或自我修复机制,是湖泊研究面对国家需求的重要科学问题,如湖泊湿地系统生态结构、功能与响应外部环境变化的调节机制;湖泊湿地系统对流域物质和能量循环的缓冲机理;湖泊湿地生态修复原理与技术;湖泊湿地的生态服务功能评价与生态功能分区等等。

4.4.2 河湖关系演变与洪水灾害响应 湖泊是流域物质和能量的“汇”,河流是湖泊与流域生态环境联结的主要纽带和通道。江河湖泊是不可分割的完整体系,尤其是在水力联系方面,湖泊具有调节江河洪水径流的巨大生态服务功能,湖泊变化将直接影响江河的洪水形势,研究洪水及其灾害对河湖关系演变的响应机理,是湖泊科学研究的重要内容。如湖泊演变的人文作用机制及对洪水过程和水情组合的影响,水利工程对河湖关系自调节机制的影响及水沙过程模拟,水利工程体系对水生态环境影响与调控,河湖关系优化调整与减灾效果评估等等。

4.4.3 流域土地利用/覆被变化及其水环境灾害效应与调控 土地利用/覆被变化是研究人类活动对生态环境影响最佳研究对象之一,土地利用变化将改变流域水文过程和污染物排放,进而对流域洪涝灾害与河湖水环境污染造成危害。因此,重点研究流域土地利用/覆被变化的过程,构建土地利用/覆被变化驱动模型,揭示流域土地利用/覆被变化对产、蓄、排水以及营养盐与污染物产生与输移过程的影响,阐明洪涝与水质恶化响应机理,提出土地利用优化与水环境灾害影响调控的对策,不仅符合学科发展前沿,而且也是生产实践的紧迫需求,如流域土地利用/覆被(数量、强度)变化过程与数字恢复,流域土地利用/覆被变化的驱动模型与驱动因子定量识别,流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪涝响应,流域土地利用/覆被变化的污染物排放量化与水环境效应,流域土地利用优化与生态环境效果评估等等。

4.4.4 大型浅水湖泊蓝藻异常增殖的生物学机制与控制 导致湖泊蓝藻异常增殖的因素很多,且这些因子之间相互依赖、相互影响,各因子之间是多维的和非线性的。这些因素包括物理湖泊学的水滞留作用、水体扰动与对流、光合作用有效辐射的垂直变化;化学湖泊学的溶解氧、营养盐浓度、比例及其形态特征转化与生物可利用性,尤其是氮、磷、铁及其它微量元素;游泳生物、浮游生物的组成、演替、生物量、种群间相互作用关系,乃至异常增殖蓝藻的生理学与生态学特征。蓝藻异常增殖是湖泊生态系统中上行效应与下行效应各种平衡过程的产物。如蓝藻异常增殖的生理、生态学特征与氮磷形态、浓度、比值的阈值;水体扰动、对流、水温和光合有效辐射对藻类群落演替影响;鱼类、浮游动物群落演替对异常增殖蓝藻组成的影响;蓝藻异常增殖对湖泊生态系统结构、功能演变的影响;生物调控对控制蓝藻异常增殖与湖泊生态恢复的作用机制;水生高等植物对蓝藻异常增殖的控制作用与恢复途径等等。

4.4.5 湖泊生态渔业与可持续发展 湖泊渔业是湖泊资源开发利用的重要方式之一,不合理的网围养殖对湖泊生态与环境的影响已经受到越来越多的关注。开展湖泊鱼类区系调查,摸清湖泊鱼类资源的家底,查明鱼类回游通道与产卵、育肥场地,并加以重点保护与生态修复;优化设计环境友好的生态无公害网围养殖模式,实现湖泊的生态健康和资源功能的持续利用和发挥。如湖泊鱼类区系及鱼类回游通道与产卵、育肥场划分与保护;不同功能湖泊水体渔业负载

力和环境容量,湖泊渔业生物能量分配和不同营养级生物资源的迁移转化,湖泊健康养殖的生态技术标准与养殖技术等等。

4.5 数字流域与湖泊 – 流域地表过程模拟

数字流域是以地理空间数据为基础,具有多分辨率、多维显示的、用以表达流域状况的专业化数字系统。它采用数字模型,对采集的数据进行分析、过滤、重组、运算,并利用系统的模型库、知识库、逻辑库、方法库为用户提供各层次的服务,以达到对流域管理、决策的支持。研究重点包括数字流域框架结构,流域基础数据库建立,流域过程模拟,流域仿真与虚拟等。如数字流域的框架结构,流域地表过程模拟与模型集成;不同尺度水过程与物质输移过程模拟;流域过程的可视化与虚拟流域;流域知识发掘技术等等。

4.6 湖泊 – 流域健康与管理

湖泊 – 流域是相互联系、相互影响的有机整体,湖泊 – 流域健康评价与综合管理是相关学科领域研究和关注的热点。重点研究建立湖泊 – 流域健康标准与评价指标体系,评估确定湖泊 – 流域生态服务价值和功能定位,划分不同生态功能区,揭示湖泊 – 流域生态系统退化的过程和机理,研究退化生态系统修复原理与技术,发展湖泊 – 流域综合管理的理论与方法,为湖泊 – 流域生态环境建设和可持续发展提供依据和指导。如湖泊 – 流域健康标准与评价指标体系;湖泊 – 流域生态服务价值评估与分区功能定位;湖泊 – 流域退化生态系统修复原理与技术;湖泊 – 流域综合管理理论与方法等等。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会地球科学部副主任柴育成研究员对湖泊及流域科学研究的支持!参加研讨的专家(按姓氏字母为序)还有:陈利顶、陈英旭、崔广柏、冯仁国、胡传林、姜彤、蒋新、康尔泗、李世杰、李文朝、刘丛强、刘家寿、陆根法、陆健健、吕锡武、潘根兴、逢勇、秦伯强、宋祥甫、孙成、王晓蓉、吴生桂、邢光熹、杨达源、杨林章、尹澄清、左玉辉等。

参 考 文 献

- 1 Naumann E, Thienemann A. Vorschlag zur Gründung einer internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie. *Arch Hydrobiol*, 1922, **13**: 585 ~ 605
- 2 Elster H. History of Limnology. *Mitt Internat Verein Limnol*, 1974, **20**: 7 ~ 30
- 3 Hasler A D. Coupling of land and water systems. New York: Springer-Verlag, 1975
- 4 Oldfield F. Lakes and their drainage basins as units of sediment-based ecological study. *Progr Phys Geogr*, 1977, **1**: 460 ~ 504
- 5 Wetzel R G. Freshwater ecology: changes, requirements, and future demands. *Limnology* 2000, **1**: 3 ~ 9