

文章编号:0559-9350(2018)09-1055-13

流域水环境与生态学研究回顾与展望

彭文启, 刘晓波, 王雨春, 邹晓雯

(中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 简要分析了流域水环境与生态学的发展历程, 系统介绍了2010年以来中国水利水电科学研究院水环境研究所取得的主要科研成果: (1)水环境监测技术与标准。形成了水环境监测分析技术与标准体系, 研发了系列水环境监测标准物质, 研究了水源地健康风险评价技术与水污染事件预警预报关键技术, 研发了水环境监测新技术与设备; (2)流域水环境与水生态过程演变机理与模型。在大型水库重金属污染物水环境演变机理及效应、生源物质流域迁移转化特征及驱动机制、生态水文过程变异与河湖生态响应机制与流域水环境与生态模型等方面取得系列创新成果; (3)流域水质目标管理与流域水环境综合治理技术。形成了水功能区达标评价技术体系、流域容量总量控制技术体系, 提出了流域水环境综合治理规划技术与湖库沉积物污染评价与生态疏浚方案制定技术, 研发了生物慢滤水处理水质净化技术及设备; (4)河湖健康评估与水生态保护修复技术。提出了河湖健康评估标准, 研究形成了河湖水系生态连通技术、生态流量确定技术、水质水量联合调度技术与水生态修复技术。最后分析了新时期水环境与生态学的科技需求, 提出了水环境研究的展望。

关键词: 流域; 水环境; 水生态; 水环境监测; 水环境模型; 水功能区; 河湖健康

中图分类号: TV21; X-1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20180651

1 研究背景

水环境质量保护和水生态系统健康事关人体健康与福祉。自1980年代以来, 我国水资源短缺、水生态损害、水环境污染问题日趋严重, 对流域水安全造成了不利影响, 解决上述问题的迫切程度不断提升, 显著驱动了流域水环境与生态学科的形成与发展。

所谓的流域水环境与生态学是研究流域涉水活动与流域水环境及水生态演化规律之间相互作用关系及调控对策, 为流域水生态文明建设提供支撑理论与方法的综合性科学, 与水文学、水力学、生态学、环境科学技术及资源科学技术等其他学科进步密切相关和高度交叉。

为了顺应国家在流域水资源保护、水环境治理与水生态修复方面不断增长的科技需求, 中国水科院于2000年在传统的水质学与水利工程学基础上, 组建了以流域水环境与生态学为学科方向的水环境研究所。中国水科院水环境研究所赋予自身“源清流清、止于至善”的科研责任, 持续夯实学科发展基础, 通过近20年来的不懈努力, 流域水环境与生态学科发展取得了重要突破, 获得了大量创新成果, 在流域水环境治理与水生态系统健康保护方面发挥了重要的作用。

2012年以来, 国家提出了建设天蓝、地绿、水清的美丽中国愿景, 为流域水环境与生态学科在

收稿日期: 2018-07-17; 网络出版日期: 2018-09-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180918.1125.005.html>

资助项目: 国家自然科学基金项目(51479219); 中国水科院创新领军人才项目(WE0145B532017); 中国水科院创新团队项目(WE0145B592017)

作者简介: 彭文启(1967-), 男, 湖南双峰人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事流域水环境过程调控理论与应用研究。E-mail: pwq@iwhr.com

通讯作者: 刘晓波(1978-), 男, 山西阳泉人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事通江湖泊与大型水库水文变异及水环境水生态响应机理研究。E-mail: xbliu@iwhr.com

新时期的发展提供了方向指引与重大机遇，以流域水环境与生态学为学科方向的中国水科院水环境研究所，需要进一步积极探索发展学科方向，争取在美丽中国建设方面发挥更大的科技支撑作用。

2 学科发展历程

2.1 国外发展概述 流域水环境与生态学重点关注的是与水利用相关的流域水质与水生态问题，从最初的粪便排放污染引起的病原体超标，到工业化国家在不同阶段出现的耗氧污染、重金属污染、硝酸盐污染、有毒有机物污染、富营养化问题，至水污染控制后期逐步显性化的自然水文要素变异、水生态功能退化、生物多样性损害等问题^[1]。

19世纪中后期，显微镜与微生物学的兴起使人们弄清了霍乱、伤寒是通过细菌在水中传播而流行起来的，从而开始了生活水源有关粪便污染水质的监测^[2]。19世纪以来，欧洲产业革命兴起，城市人口集中，英国泰晤士河及德国埃姆舍河等河流水质污染日趋严重，成为欧洲最脏河流的典型；进入19世纪中后期，河流黑臭问题突出，流域内鱼虾绝迹，疾病流行，英国泰晤士河^[3]及德国埃姆舍河^[4]等欧洲最脏河流的治理正式启动，流域水环境综合治理研究也随之开始。

1925年，斯特里特(H. W. Streeter)和费尔普斯(E. B. Phelps)为解决河流耗氧污染问题，研究建立了第一个水质模型(S-P模型)^[5]，是水质模型研究的标志性事件。1962年Rachael Carson具有里程碑意义的生态学著作《寂静的春天》出版^[6]，1972年联合国为顺应全球兴起的环保浪潮，在斯德哥尔摩召开了人类环境会议，拉开了全球环境保护运动的序幕^[7]，环境学研究进入新阶段。1972年美国颁布《清洁水法》^[8]，提出了水体物理、化学及生物完整性保护与恢复目标要求，面源污染、水体功能保护与水质目标管理成为水环境学研究的主要内容。

在关注水污染治理与水质改善的同时，河流水生生态保护与修复的探索性案例也不断出现，如1987年以生态系统恢复作为莱茵河重建的主要指标的“莱茵河行动计划”，即“鲑鱼-2000计划”启动^[9]，提供了以单一物种为目标的大型河流生态修复的经验。1990年代开始尝试开展流域尺度下的河流生态修复工程^[10]，美国的基西米河及密苏里河的生态修复规划实施，标志着大型河流的全流域综合生态修复工程进入实践阶段；在保护流域水生态改善流域管理方面，通过生态修复试验-反馈-修正进行生态系统的适应性管理，如美国科罗拉多河格伦峡大坝的适应性管理规划以及澳大利亚墨累-达令河的环境流管理均是成功案例。

进入21世纪，全球河湖生态系统退化问题逐渐受到国际社会的广泛关注和重视，2000年，《欧盟水框架指令》提出生态良好水体保护要求，保护和恢复河湖水生态系统健康成为流域管理的重要目标指向，水环境与生态学的研究内容从水质全面拓展到水生态系统^[11]。

2.2 国内发展概述 流域水环境与生态学在国内的发展，与国家保障水安全的阶段问题与需求契合，大致可以分为3个阶段。

第一阶段：1950—1980年代，重点关注江河湖库天然水质监测评价的流域水质学研究阶段。1950年代，我国开展了大量的水质监测工作，收集了江河天然水质的大量资料，着手监测天然水化学成分^[12]。随后，建立健全了各流域水质监测中心，1984年7月根据中华人民共和国国家科学技术委员会的批复，成立了水利水电部水质试验研究中心，即中国水科院水环境研究所的前身。期间重点在天然水水质和重金属等水质参数的监测技术开发与应用方面开展研究^[13]，为流域水质管理奠定技术基础。

第二阶段：1980年代—21世纪前10年，重点聚焦流域水污染治理的流域水环境学研究阶段。1970年代初的官厅水库水污染治理开启了我国在水环境治理的研究^[14]，其后，作为流域水污染治理的水力学与水质学基础，环境水力学研究在1980年代迅速兴起^[15]，1990年代初，中国水利学会成立环境水力学组，水质及模型技术研究进展加快，中国水科院在环境水力学研究方面成为国内主要学派之一^[16]，研发了多类水质与水温模型，在太湖、滇池等湖泊，黄河、淮河等河流开展了水环境问题与综合治理方案研究；1990年代国家对环境影响评价管理逐步重视，作为国内最早从事环境影响

评价研究的科研单位之一，中国水科院于1995年组建了环境影响评价研究中心，成为首批环境影响评价甲级资质单位，承担完成了大量水利水电及火电工程环境影响评价技术工作^[17-18]。2000年为了顺应水环境学的快速发展，中国水科院在传统的水质学与水利工程学等学科基础上，组建以水环境与生态学为学科方向的水环境研究所。水环境研究所在成立后的前10年中，重点在大型湖库水环境演变机理、痕量有毒有害有机污染物监测技术开发与应用、水环境标准化体系与信息化技术、流域水环境模型与水质目标管理技术、饮用水安全保障、水工程环境影响评价技术、生态水工学基础理论等流域水环境学方面开展研究，为流域水环境保护提供技术支撑^[19-21]。

第三阶段：2010年以来，全面进入流域水生态系统健康保护的流域水环境与生态学研究阶段。《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》(中发[2011]1号)提出建成水资源保护和河湖健康保障体系的目标要求，2012年以来，国家提出了建设天蓝、地绿、水清的美丽中国愿景，为大力推进生态文明建设，按照“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”原则，国家制定了《水污染防治行动计划》(国发[2015]17号)，印发了《关于全面推行河长制的意见》和《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》。在推动长江经济带发展方面提出了共抓大保护、不搞大开发的重要战略思想。上述国家战略为流域水环境与生态学科在新时期的发展提供了方向指引与重大机遇。进入2010年代以来，中国水科院水环境研究所在流域水环境演变机理与模型、流域水质目标管理与水功能区限制纳污、水环境新型污染物监测分析方法、河湖水环境治理技术等流域水环境学专业方向基础上，向流域生态水文过程演变与生态响应机制、河湖健康评价标准与方法、地下水与城市水系综合治理、生态流量与生态调度、河湖生态修复等流域水生态系统健康保护学科方向拓展^[22-28]。

3 主要研究进展

2000年，中国水利水电科学研究院组建以流域水环境与生态学为学科方向的水环境研究所。目前，水环境研究所是水利部水环境监测评价研究中心和水利部水质监督检验测试中心的挂靠单位，是流域水循环模拟与调控国家重点实验室、水利部水资源与水生态工程技术研究中心、湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室、水环境监测技术与装备国家工程实验室的组成单位。

水环境研究所秉持“源清流清、止于至善”的所训，以生态文明建设的重大国家需求为导向，以建立流域水资源保护与河湖健康保障理论与技术体系为指引，以流域水环境及水生态过程机理与调控技术研究为主要学科特色，面向流域水资源保护、水环境治理与水生态修复等流域治理工程实践，开展基础理论、重大工程关键技术和自主技术创新研究，不断拓展流域水环境与生态学科方向，为国家和行业提供技术支撑。研究所已经建设成为水功能区达标考核全国技术总中心，水质监测评价水利行业技术总平台，河湖健康评价、水生态保护和修复水利行业技术总支撑。

中国水科院水环境研究所在2008年对学科研究进展进行了阶段梳理^[13]，下面重点对2008年以来的研究进行总结^[21-28]。

3.1 水环境监测技术与标准 在常规水质参数、重金属、有机污染、痕量、超痕量有毒有害污染物等指标监测技术研发与应用研究基础上^[12]，在水环境监测分析技术与标准、水环境监测标准物质研制等方面取得新的进展。

3.1.1 水环境监测分析技术与标准 在水环境监测分析标准研究、水源地优先控制风险污染物筛查等方面，承担了大量科技研究项目，如国家重大科学仪器专项：新型等离子体质谱关键部件研制与创新研究—等离子体质谱在水样痕量金属元素分析中的应用研究；科技推广项目：《水中有机物分析方法有机磷农药的色谱测定》、《水中有机物分析方法卤代烃类挥发性有机物的气相色谱法测定》、《水中有机物分析方法丙烯醛、丙烯腈和乙醛的色谱测定》等。基于上述研究，编制了《气相色谱法测定水中酚类化合物》(SL463-2009)、《气相色谱法测定水中氯代除草剂类化合物》(SL495-2010)、《水质 有机磷农药的测定 固相萃取-气相色谱法》(SL739-2016)、《水质 氯苯的测定 气相色谱-质谱法》、《水质 总氮、挥发酚、硫化物、阴离子洗涤剂 and 六价铬的测定 连续流动分析-分光光度法》等水环境监

测的行业标准。选择我国重点流域中的典型水源地，调查评价了水源水体中具有生态和健康风险的有毒有害污染物和致病微生物(85种VOCs、62种SVOCs和131种PPCPs)现状浓度和风险水平，研究提出了筛查和优先排序技术方法，形成了典型水源地优先控制风险污染物数据库，编制了《生态风险评估评价导则》(SL/Z 467-2009)。

结合水环境研究所在2008年以前编制的水环境监测分析标准，共计形成了30余项行业分析方法标准，奠定了在水利行业水质监测方法标准方面的权威地位。

在实验室水质检测能力方面，检测指标的范围显著扩大，包括了水(含地表水、地下水、饮用水、废水及大气降水)、底质与土壤、水生生物三大类共199项参数。具备300余项有机污染物的检测能力，其中挥发性有机物60余项，半挥发性有机物13类200余项：多环芳烃类、有机氯农药类、有机磷农药类、多氯联苯类、邻苯二甲酸酯类、酚类、硝基苯类、氯苯类、多溴联苯醚类、多溴联苯类、雌激素类、药物及个人护理产品类、二噁英类化合物等。

3.1.2 水环境监测标准物质研制 近10年以来，承担了《水中系列标准物质标准溶液研制》、《氯代苯类单组份溶液标准物质》、《多氯联苯沉积物标准物质研制》、《典型流域重要水源地新兴风险污染物标准物质研制》和《二噁英类化合物沉积物标准物质》等约20项标准物质研制项目，研制生产标准物质153种，其中国家一级、二级标准物质75种、工作标准物质78种，基本涵盖《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中的所有常规项目、一级部分有机项目，为水利系统水质监测量值溯源、行业质量控制提供系统技术支撑。

3.1.3 饮用水源地健康风险研究 围绕我国饮用水源地风险管理需求，以典型水源地为研究试点，开展健康风险研究。先后研究建立了8类200多种有毒有机污染物定量分析方法、风险污染物筛查和风险评估技术方法体系，整体评价我国典型水源地的风险水平，并在国内外学术期刊发表健康风险评估论文20余篇。

3.1.4 水污染事件应急预警预报关键技术 针对我国日益频发并对水资源利用与河湖生态危害极大的突发水污染事件的预警预报中存在的重大技术问题，突破了多泥沙水体水质自动采样及监测技术、水污染突发事件应急水力调度耦合模拟技术、湖库富营养化分区预警预测技术、基于三维动态纹理映射技术的污染水团三维可视化动态仿真技术等关键技术，研发了由有毒有害化学品数据库—水质自动监测与信息传输—预警预报模型—数据集成管理系统—三维可视化展示—信息发布等组成的水污染突发事件决策支持平台，并研发了松花江、辽河太子河、黄河小浪底以下干流、海河于桥水库等河湖的水污染突发事件预警预报系统，为这些流域水污染突发事件应急处置管理能力的提升提供了重大技术支撑^[29]。

3.1.5 水环境监测新技术与设备 针对河长制管理要求，研发基于无人水面船的水环境监测系统，研发具有自主知识产权的无人水面船水环境监测系统，并实现实时监测影像、环境指标数据传输与分析，形成河湖水环境问题巡查快速高效识别平台。针对入河排污口监管需求，研究构建重要水功能区入河排污口环境遥感技术体系与监管方法体系，包括基于航空(无人机)平台及高分遥感影像的入河排污口识别技术方法研究、基于无人机平台的入河排污口检测分析与管理软件研发等。开展了基于大数据分析的水功能区控制单元水质风险源信息分析技术方法研究、基于卫星影像信息的水环境问题识别技术研究等。

3.2 流域水环境与水生态过程演变机理与模型

3.2.1 大型水库重金属污染物水环境演变机理及效应 在大型水库重金属污染物水环境演变机理及效应研究方面，承担了国家自然科学基金“三峡库区水位变化条件下沉积物中Sb(Ⅲ)和Sb(V)的迁移转化机理研究”、国家重点实验室项目“大型水库重金属元素水环境过程研究”等项目，提出了基于“地球化学基线及人为污染判别→典型污染物识别及稳定同位素源解析→典型污染物水环境过程→典型污染物水环境与水生态风险评估方法与技术”为一体的水库重金属污染物水环境过程及效应评价整体技术方案。建立了基于区域地球化学基线和梯度扩散薄膜技术(DGT)相结合的水库沉积物金属污染物释放及评价方法。相关研究成果在国内外学术期刊发表学术论文100余篇，其中，发表SCI收录论

文 60 篇(40 篇 SCI 论文影响因子 >2.5, 发表 2 区及以上 SCI 文章 24 篇)。SCI 他引 600 余次, 1 篇 SCI 论文入选全球“环境与生态”领域(Environment/Ecology)ESI 高被引论文(Highly Cited Paper)。

3.2.2 生源物质流域迁移转化特征及驱动机制 在生源物质流域迁移转化特征及驱动机制研究方面, 承担国家自然科学基金项目“梯级水电开发下澜沧江径流过程与生源物质输运变化监测研究”、“藏木电站蓄水运行对雅鲁藏布江河流生源物质输送的影响”、“氮磷生源要素在华北地区源头溪流系统中的滞留特征研究”和“华北区域源头溪流系统中氮素迁移转化特征及驱动机制研究”等, 基于系统的野外监测试验研究分析, 获得了源头区域与径流过程重大变异水域的生源物质流域迁移转化规律的研究成果。

采用高通量测序技术方法系统研究和分析湖泊微生物群落, 研究湖泊富营养化造成的氮盐增加对微生物群落的影响, 探究微生物氮循环的适应过程, 分析大区域空间尺度上生态系统结构和功能的演变机制。

3.2.3 生态水文过程变异与河湖生态响应机制 在大型水库水环境与生态演变机理方面, 承担“三峡库区支流浮游植物生态过程的营养驱动及补充机制研究”、“水体内部机理对三峡库区支流水华生消的影响研究”以及“三峡库区浮游细菌群落结构特征及其对支流水华的生态作用研究”等国家自然科学基金项目, 承担国家水专项“三峡水库水环境演化与安全问题诊断研究”、“不同水位运行下水环境问题诊断及安全保障研究”等项目, 针对三峡水库蓄水以来的水环境和生态演化趋势, 通过对三峡水库逐渐进入 175 m 水位运用阶段后水文水动力情势的变化特征研究与水环境跟踪监测, 揭示了超大型水库生态环境演化的湖沼化过程, 基本厘清了大型水库蓄水运行初期的水环境演变特征与趋势, 为全面控制库区富营养化提供理论基础。

在大型水库温室气体发生发展机制方面, 依托中国长江三峡集团公司项目“三峡水库温室气体源汇监测与分析研究”和“金沙江下游梯级水电站温室气体通量观测与分析”, 以及国家自然科学基金项目“三峡水库典型水域 N_2O 通量特征及脱氮转化微生物作用机制研究”、国家重点实验室项目“三峡水库典型水域碳循环关键过程的生物地球化学研究”等, 开展了三峡库区干支流碳源汇效应研究, 揭示了大型水库温室气体发生发展机制。

在大型通江湖泊生态水文演变机制方面, 承担国家自然科学基金重点项目“鄱阳湖水环境变化与水生生物群落演替的驱动机理”和鄱阳湖水利枢纽工程环境影响研究, 系统研究识别了江湖关系变化特征与发展趋势, 揭示了鄱阳湖水文水动力与水环境演变特征, 形成了水文情势驱动下湖区湿地及底栖动物群落和关键物种影响机制的认识。

在重度退化河流生态水文过程演变机制方面, 承担北京市自然科学基金重点项目“生态-水文响应及其机制研究课题与溪流生态学研究课题”, 研究了永定河生态水文过程变异特征与驱动机制, 揭示了强人为活动干扰下的河流廊道生态水文过程, 开展了变异水文过程累积作用下的溪流生态学响应机理研究, 分析了强人类活动干扰下的河道径流匮乏机制、河流生态系统退化特征。

在河流湿地方面, 依托国家自然科学基金项目“水沙变异下湿地生态演变过程及驱动机制研究”, 研究黄河三门峡库区湿地在不同运行方式下湿地演变规律, 构建了湿地生态景观格局参数及湿地生态系统优势物种与水文调控的表征函数, 从自然和人为两个方面辨识湿地生态演变的驱动力, 为水库生态调度和生态适应性管理技术和方法体系提供有关研究基础。

在长江上中游典型鱼类繁殖的生态水文需求方面, 依托国家科技支撑项目“葛洲坝下中华鲟产卵场水文水动力条件研究”“长江四大家鱼产卵场水动力特性研究”“珍稀特有鱼类繁殖生长的关键栖息地及其特征”和“赤水河鱼类栖息地模型”等, 以长江上中游四大家鱼和中华鲟为研究对象, 研究了典型鱼类繁殖规模与非生物因子相关关系, 识别了影响典型鱼类繁殖的关键生境因子, 分析了繁殖规模与关键生境因子的响应关系, 得出了四大家鱼和中华鲟繁殖的水文需求, 构建描述长江上游珍稀特有鱼类国家级保护区干流栖息地地貌指标体系, 分析得出不同产卵类群鱼类及典型鱼类产卵场水环境及地貌特征, 分析了鱼类关键生境(产卵场、索饵场)和地形地貌、水动力特征之间的关系。

3.2.4 流域水环境与生态模型 湖泊水质模型。自主研发了适宜复杂地形影响下滇池湖面风场模拟技术、水动力模拟技术和入湖污染物迁移扩散模拟技术，系统形成了复杂地形遮挡影响下滇池水动力与水质模拟技术，提高了滇池湖区污染物迁移扩散的模拟精度，分析滇池湖泊水环境演变过程，提出为实现滇池水质目标所需的补水量、补水水质及相关过程，预测牛栏江-滇池补水工程来水后湖区水质及水质目标可达性，支撑了牛栏江-滇池补水工程的建设运营。

湖库生态动力学模型。基于三峡水库水环境与富营养化过程原位监测与演变机理研究，构建多过程耦合的水库生态动力学模型，在超大型水库水生态环境演化及富营养化防控机理的科学认知方面取得进展。针对鄱阳湖水文过程与水环境过程变化的生态效应研究需求，研发了湖泊水动力学、水温、水质及富营养化模型，形成了湖泊湿地生态水文过程模拟分析系统。

流域非点源模型。在辽河流域、三峡库区流域、香溪河流域、小江流域等区域构建了分布式的非点源模型，系统评估了流域的污染负荷时空分布特征。围绕城市水系水质达标规划需求，研发了基于MUSIC的城市区水环境治理方案优化模拟分析模型，对城市非点源污染现状及非点源截留措施、海绵城市建设措施等治理效果进行评价和预测，为城市河流管理者做出有效决策提供支撑。

生态流量确定模型。针对水资源短缺流域生态流量确定问题，研发了面向生态流量保障、统筹考虑自然水循环与社会水循环的生态流量流域整体模型。

水质水量联合调度模型。围绕河流水污染控制和水质改善目标，在河流分质水量台账基础上，在海河北运河开发了河流分质水资源调配的水量水质联合调度模型系统。围绕生态流量保障需求，在浑太河流域研发了大型水库群及闸坝联合调度优化模型。

鱼类生境及过鱼设施模型。研发了闸门及水坝仿自然鱼道模拟系统软件及鱼类生长栖息地适宜性计算软件，精细描述鱼类游泳、徒涉、及其它活动所需的水流条件，提出基于栖息地指示物的优化技术方法。

3.3 流域水质目标管理与流域水环境综合治理技术

3.3.1 全国水资源质量调查评价 承担水利部项目《二十一世纪前十年水功能区水质变化调查评价》，首次形成省级行政区批复的水功能区划成果，摸清了全国水功能区水质达标状况基数，揭示了水功能区水质变化趋势。承担全国水资源质量年度评价工作，编发《中国水资源公报》水质部分与《全国水资源质量年报》。在全国水资源第三次调查中，承担地表水水质与水功能区污染物入河量调查评价，参与《第三次水资源调查技术细则》编制。

3.3.2 水功能区达标评价技术体系 围绕最严格水资源管理制度水功能区限制纳污红线制度建设要求与重大技术问题，承担水利部水功能区监督管理方面的系列项目，提出了水功能区达标考核指标体系与目标分解方案，形成了2015、2020及2030年各省、自治区、直辖市重要江河湖泊水功能区水质达标率控制目标成果，为《国务院办公厅关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》(国办发[2013]2号)提供支撑。研究制定了水功能区达标评价技术方案，编制《全国重要江河湖泊水功能区水质达标评价技术方案》(办资源[2014]54号)及其《修订稿》(办资源[2016]91号)，形成了健全的水功能区水质监测、统计、评价、监管技术体系，作为全国重要江河湖泊水功能区达标评价全国技术工作组，自2013年承担完成了全国重要江河湖泊水功能区达标率成果的省区、流域及全国汇总、分析、协调，编制全国重要江河湖泊水功能区水质达标评价报告，全面、客观、科学、系统、真实地反映全国、流域及省区水功能区水质达标情况，为水功能区限制纳污红线考核提供系统支撑。正在组织编制水利部标准《水功能区达标评价技术导则》。同时，依托水功能区监督管理方面的系列项目，提出了水功能区水质风险图技术方法，研究编制了全国重要江河湖泊水功能区水质风险图编制技术导则(初稿)，并应用导则方法编制了滦河流域、太子河流域水功能区水质风险防控图。

3.3.3 流域容量总量控制技术体系 承担国家水体污染控制与治理科技重大专项“流域水生态承载力与总量控制技术课题研究”、“重点流域生态流量保障与容量总量控制关键技术与示范研究”、“三峡库区小江汉丰湖流域水环境综合防治与示范”以及全国水资源保护规划专项“入河污染物限排总量分解与控制关键技术”，提出了水功能区控制单元区划及技术方法，形成了以水功能区水质达标为导向

的水功能区限制排放总量控制理论与技术，丰富和完善了流域水环境综合治理规划技术方法。

“入河污染物限排总量分解与控制关键技术”提出基于水功能区水质达标要求的动态限制排污总概念量与核算技术方法。“重点流域生态流量保障与容量总量控制关键技术与示范研究”针对控制断面水质达标管控要求，提出基于控制单元分级、以月为时间单位的容量计算分解技术方法，解决了复杂流域容量总量计算分配中存在的流域协调性差及与年内水文过程不匹配问题，形成基于水环境控制单元的辽河流域污染物入河总量月控制方案，在辽河干流保护区实现入河污染总量监管平台业务化运行。“三峡库区小江汉丰湖流域水环境综合防治与示范”针对三峡水库蓄水运行以来支流出现的水环境问题，围绕库区及流域水污染防治规划的技术需求，以三峡库区人口密集、社会经济高速发展的开县汉丰湖流域为对象，研究确定了基于水质目标管理的受双重水位变动影响的典型湖库分期、分区、分类水环境承载力计算及限制排污总量分解技术，构建了基于流域分布式污染源模型的汉丰湖入湖负荷预测评估技术，提出了基于水环境容量的汉丰湖流域污染控制单元和主要污染源的总量控制方案，形成三峡库区小江汉丰湖流域水污染综合防治技术集成方案。

3.3.4 流域水环境综合治理规划技术 水环境研究所在前期的水动力学及水质模型研究成果基础上，进一步研发了流域水文模型与非点源模型、城市非点源污染控制方案优化分析模型等，构建了流域水环境综合治理方案制定的完整技术体系，形成包括流域水环境模型、水环境问题诊断、污染负荷计算、水体环境容量(纳污能力)计算与分解、污染负荷削减方案等一系列关键方法和技术。在三峡库区小江汉丰湖流域，耦合污染负荷预测模型和系统动力学模型，建立了水污染防治措施评估及最优化技术方法，形成了流域水污染综合防治技术集成方案。

在城市水环境治理方面，形成基于流域水环境过程的城市水环境治理关键理论与技术体系并开展应用。以流域网格化污染源调查与解析为基础，以污染源与水系水质响应关系为依据，以断面水质目标倒逼陆域污染负荷控制为核心，考虑城市二元水循环机理与污染物输移特征，形成了调查分析-目标制定-总体布局-措施体系构建-模型预测优化的城市水环境治理理论与技术体系，覆盖了源头控制-过程削减-末端治理的全过程，以及区域内山水林田湖草全系统生态要素上述技术体系，已经在深圳市、北京海淀区开展了应用，并将在湖北省松滋市进行应用验证。

3.3.5 湖库沉积物污染评价与生态疏浚方案制定技术 针对湖库沉积物污染问题，在海河流域的潘家口和大黑汀水库、宜昌市黄柏河流域饮用水水源地水库以及洞庭湖流域的小南海湖泊等，开展沉积物污染状况调查评价与水-沉积物界面过程研究，提出了底泥生态疏浚及污泥处置的系统性方案。

3.3.6 农村饮水安全保障技术 结合国家农村饮水安全工程建设，研发了生物慢滤集中式供水设施和分散式供水装置，并在甘肃会宁县、湖北宜昌市、贵州赫章县、福建邵武市等农村地区进行了示范应用，共解决15万多农民饮水安全问题，具有很广阔的推广应用前景。依托国家水专项“集雨饮水安全保障技术集成与示范”，研制完成2套集雨水处理设备(生物慢滤水处理设备和自动粗滤-精滤水处理设备)，1套集雨水消毒设备，在甘肃庆阳西峰区和白银会宁县开展了技术和设备示范，出水水质达到了生活饮用水卫生标准要求。依托水利部推广项目“保障农村饮水安全的生物慢滤水处理技术”，采用自主研发的生物慢滤水处理技术，结合国家农村饮水安全工程建设，在湖北省秭归县12个乡镇推广建设了小型集中式和单户分散式2种模式的生物慢滤饮水处理设施，建成集中式生物慢滤饮水处理工程94处，处理规模为10 t/d~200 t/d；单户分散供水设施1128处；共解决了7.242万农民的饮水安全问题，出水水质达到了国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中“农村小型集中供水和分散式供水部分水质指标及限值”的要求，培训农村技术管理人员100多人次。

3.4 河湖健康评估与水生态保护修复技术

3.4.1 河湖健康评估 自2010年开始，依托水利部全国重要河湖健康评估项目，提出了适合我国河湖特征的河湖健康指标体系与标准，编制了《全国重要河湖健康评估(试点)工作大纲》、《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》(办资源[2010]484号)以及《湖泊健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》(办资源[2011]223号)。作为全国技术工作组，自2010年以来，中国水科院水环境研究所与7个流域机构选择重要河湖开展定期评估，截止2016年底，在松花江干流、太子河、滦河、永

定河、黄河干流、淮河干流、汉江及桂江等18条河流，鄱阳湖、洞庭湖、太湖、白洋淀、洪泽湖、抚仙湖、洱海及查干湖等10个湖泊，丹江口水库、小浪底水库、于桥水库、丰满水库及新安江水库等8座水库，共计36个河湖水体开展了为期3~5年不等的评估工作，编发全国重要河湖健康评估报告，基本形成全国河湖健康定期评价制度。2017年，按照《关于全面推行河长制的意见》的要求对河流及湖泊健康评估指标、标准与方法进行了修改，编制了《河湖健康评估技术导则》。

3.4.2 河湖水系生态连通技术 随着经济社会的发展，河湖水系的连通格局发生重大变化。部分河流因为水流不畅或者连通断绝，出现了泄洪不畅、水质变差、水资源配置不均的情况。河湖水系连通成为当前我国应对严峻水形势的一项重要举措。水利部安排部署了河湖水系连通战略研究等相关工作，各地也相继开展了一些河湖水系连通实践，陆续取得了有益的经验。自2015年起水利部为继续引导和支持地方积极开展河湖水系连通工作，加快水生态文明试点建设，启动了水生态文明试点城市河湖水系连通项目库建设开始补助，实施了一批河湖水系连通项目，优化了有关试点城市水生态建设格局。但由于河湖水系在水文、水环境、地形地貌、区域经济等方面的复杂性，对河湖水系连通及其环境影响还缺乏足够的认识，以水生态环境修复与保护功能为主，同时兼顾水资源配置和防洪减灾功能的河湖水系生态连通规划关键技术研究仍显滞后。

在生态文明理念的指导下，中国水科院水环境所承担了水利行业专项“河湖水系生态连通规划关键技术研究及示范”、“基于水系联通的水资源优化配置与调度技术-山东半岛蓝色经济区复杂水网地区多水源优化配置模拟”、“北运河-永定河水系连通与水质水量联合调度关键技术和示范”等项目，提出了河湖水系三流四维生态连通模型，描述了河流在横向、纵向、垂向和时间四个维度的连通特征，以及以水为载体的物质流、物种流和信息流在三维空间流动的生态影响；形成了包括水文-地貌-生物连通性生态调查和基于图论的连通性分析技术；开发了基于一维和二维水动力和栖息地模拟的水量-水质-生态耦合分析模型技术；研发了内嵌数据库、模型库、案例库，基于连通度分析的水系生态连通总体布局方案优选技术、集成了包括纵向连通工程技术、横向连通工程技术和垂向连通工程技术的水系生态连通规划工程技术；提出了水系生态连通规划效果后评估技术等五大技术体系；并在珠江流域、江苏省扬州市、山东省等不同区域示范点，进行了平原河网地区水系连通规划评估技术、基于物质流连通的河湖连通模拟与连通方案优选技术、基于信息流连通的河湖连通模拟与连通方案优选技术和基于物种流连通的垂向连通模拟技术等关键技术的示范应用；考虑我国目前的河湖水系生态连通现状及需求，形成了典型区河湖水系连通规划技术准则。

3.4.3 生态流量确定技术 国家水专项“重点流域生态流量保障与容量总量控制关键技术与示范研究”针对水资源短缺、“三生”用水矛盾突出且长期存在等不利问题，围绕生态流量科学确定问题，提出了分级生态流量核定技术，构建了“流域生态流量管理分区-环境保护目标及关键流量组分分类-生态水文节律和不同水平年分期-执行程度预警分级+流域上下游协调与三生用水协调”(即“四分+协调”)的生态流量确定技术链，提出了科学适用的分期逐月《辽河流域生态流量管理方案》，为流域水资源管理工作采用，支撑了辽宁省“水十条”的实施。针对生态流量计算方法繁多而环境保护目标及水量需求不明确的困局，在水生态功能分区的基础上根据流域现状特征及未来恢复需求，构建了生态流量管理分区、环境保护目标分类、不同水期及水平年分期和执行程度预警分级的“四分”生态流量标准计算方法，解决了响应河流生态过程的生态流量底线难以科学确定的难题。结合流域水资源供用耗排格局，研发了以生态流量标准保障为导向，流域尺度内径流、蒸发、各业需水、各业用水及水源工程调度特征与生态流量整体协调的模型，制定了适用于高度人工调控河流的生态流量管理核定方案，实现多准则的生态流量方案体系有机融入水资源日常管理工作，实现流域上下游协调与“三生”用水基本协调，破解了以往生态流量方案与现实的水资源紧缺及管理状况脱节难题。

针对河流水景观功能保护需求，建立“水文-近岸区涨落映射关系”概念模型，推动景观生态学与河流生态学(尤其是鱼类栖息地研究)的结合，阐明河流景观的基底、斑块的内涵、动态变化特征以及河流生态系统的景观构成，发展河流景观生态学；明晰水文过程中各生态水文组分的划分标准，建立基于河流景观生态学理论的生态流确定方法，论证方法的适用性，选择典型河流进行验证和示

范。

在大型水库工程生态流量确定方面，采用BBM等方法科学确定工程下泄生态流量，制定了国家172项重大水利工程中内蒙古引绰济辽工程、黑龙江鹤岗关门嘴子水库、内蒙古林西东台子水库、陕西东庄水利枢纽等重大工程的下泄生态流量保障方案，通过了国家环保部审批。

湖泊方面，以江西省鄱阳湖、云南程海湖、贵州省草海湖等为例，依托咨询研究项目，开展了湖泊生态需水及补水需求的分析研究工作。通过在贵州省草海湖野外监测与试验、数值模拟分析等手段，开展湿地保护性物种栖息及湿地生态系统自然演替的生态水文需求研究，提出湿地生态系统自然演替规律及其生态需水量与过程。

3.4.4 水质水量联合调度技术 在水质水量联合调度方面，在前期的太湖调水、滇中调(引)水等重大工程研究成果基础上，依托国家水专项“北运河水系水量水质联合调度关键技术与示范研究”、“三峡库区小江汉丰湖流域水环境综合防治与示范”、“重点流域生态流量保障与容量总量控制管理关键技术与应用示范”以及“重点流域水质水量水生态联合调度及水质改善集成技术研究”等课题，围绕河湖生态水量保障与水质改善需求，研究提出了保障流域水环境质量的“水质水量联合调度的原则、评价方法和调度方案”。

“北运河水系水量水质联合调度关键技术与示范研究”针对城市区域河流清水资源匮乏、水动力强度不足、水华问题突出问题，开展了多水源优化调度与闸坝优化调控的水质水量联合调度技术研究。与示范。“三峡库区小江汉丰湖流域水环境综合防治与示范”以三峡库区的小江调节坝为对象，围绕藻类水华控制，研究了藻类生长与繁殖的生态水力学机理，提出了缓解汉丰湖库区和坝下富营养化的水库优化调度方案。“重点流域生态流量保障与容量总量控制管理关键技术与应用示范”围绕水资源短缺流域容量总量不足、生态流量难以切实保障问题，针对流域水工程特性参数与供水差异性特点，提出兴利供水与生态供水相结合、基于生态流量分级控制的库群供水规则制定技术，提出面向生态用水保障的库群联合调度引水图制定技术，形成高效引水、减少弃水的水库群保障生态流量能力的深入挖掘；基于流域水库群“三生”供水规律分析，构建基于农业与生态供水耦合的水库群联合调度模型，破解水资源短缺流域水情偏枯条件下总量不足难题；针对水文年际变化特点，采用“评估分析-改进应用-再修正-再应用”的“滚动修正”策略，形成与年度水情特点相适应的流域水库群生态调度技术方案，进一步挖掘了水工程生态流量保障潜力；提出的《辽河流域水质水量联合调度方案》、形成的《辽河流域水工程生态调度技术导则》被辽宁省水行政主管部门采纳，用于水库工程调度管理实践。其中《辽河流域水工程生态调度技术导则》已于2017年在辽宁省质量技术监督局立项，进入辽宁省地方标准征求意见程序。

在面向四大家鱼和中华鲟繁殖要求的生态调度方面，通过野外监测和数值模拟等技术手段，研究了四大家鱼和中华鲟繁殖的生态水文和水力学需求，提出了满足珍稀特有鱼类繁殖需求的生态调度要求，并在三峡水库进行了应用，取得了良好的效果，生态与社会经济效益显著。

3.4.5 水生态修复技术 国内对江河湖泊的水生态修复工作在近年得到了长足的发展^[30]。针对位于干旱、半干旱区，流域中上游过量用水改变了自然生态格局，导致湖泊湿地萎缩乃至干涸的居延海、乌梁素海和博斯腾湖，“十二五”期间，在国家及地方一系列规划指引下，以加强自然湿地保护有效性为目标，通过水资源调配，开展生态补水；通过生物和工程措施，防止水土流失，控制湿地周边土地沙化趋势；针对乌梁素海和博斯腾湖的富营养化问题，还分别开展了基于水生植物收割减少内源氮磷释放，基于湖滨带湿地削减入湖营养负荷等工程示范，取得了良好效果。而对于淡水资源缺乏、近岸带湿地生态退化、岸线蚀退与自然灾害、污染加剧的黄河三角洲湿地，2002年以来，水利部黄河水利委员会以引黄补水作为主要手段，先后开展了12次调水调沙工程，疏通了黄河输水河道，提高了土壤含水量，大幅增加了三角洲湿地面积，对退化湿地进行了初步恢复。对于天然径流基本断流、水面蒸发量大、富营养化程度较高、沼泽化程度严重、生物多样性显著降低的白洋淀，2017年6月，原环境保护部将白洋淀与洱海、丹江口一同列入“新三湖”，并对其污染防治和生态保护工作提出新的要求。水利部门先后组织开展了引黄入冀补淀、南水北调中线生态补水、本流

域上游水库补水等工程，累计补水量超过1.4亿 m^3 ，有效改善了白洋淀地区生态环境状况。中国水科院水环境所近年来也在河流、湖泊生态修复的技术、标准等方面开展了较多的研究。

在河湖生态修复技术标准方面，在对国内外水生态保护与修复进展情况广泛调研的基础上，考虑我国不同生态类型区的差异，结合全国水生态系统保护与修复试点及水生态文明城市试点的建设实践情况，编制《河湖生态保护与修复规划技术导则》(SL709-2015)，规定了河湖生态保护与修复工程建设的总体框架、主要措施、主要指标和验收管理办法。

在河流水生态修复技术方面，依托北京市科技项目“温榆河河道生态治理技术与示范”，提出了“河道内并联水路多级强化水质净化生态技术”，并通过“948”项目进行推广，该技术突破了河道纵横断面构建型式、水流流态设计、生态护槽护岸材料与技术、河流曝气、河流生物链构造及培育等技术，针对温榆河水质改善要求，集成河道生态修复技术，建设示范工程，构建了纳污河流生态修复的技术体系。

在湖泊水生态修复理论方面，以我国最大的淡水湖—鄱阳湖为例，自2012年以来，中国水科院水环境所联合多家研究单位，开展了江湖关系变化及影响、河湖关系及五河流域水资源调控、河湖水环境、湿地与候鸟、水生及江豚、地下水环境等10多个方面的专项研究，对鄱阳湖水文水资源、植被、鸟类、鱼类、江豚等关键要素的现状特征、问题与变化趋势开展了系统研究，从湖区水位调控、自然保护区管理、替代生境营造、流域水环境综合治理、鱼类和江豚洄游通道建设等方面提出了鄱阳湖保护和修复的具体措施。

村镇受损生态系统修复与重建方面，依托科技支撑项目“村镇受损生态系统修复与重建实用技术研发”，针对当前我国村镇生态系统受损严重、缺乏相应的受损生态系统修复与重建实用技术的现状，开展陆域废弃场地低碳生态修复与景观化实用技术、生态岸线恢复技术、河道沟渠以及塘坝水体修复等技术研发，形成一整套适用于我国不同地域、不同水体的村镇受损生态系统修复与重建成套实用技术体系，为乡村振兴河湖水生态修复提供技术支撑。

水利工程水生态影响缓解方面，主要对过鱼设施技术开展了研究。依托国家自然科学基金项目“鱼类趋流行为的水动力触发机制研究”，利用室内水槽试验，获取各场景下水槽中不同水力要素的空间分布，通过摄像提取鱼类个体位置、停留时间和运动速度等方面的数据，综合水动力条件和鱼类趋流行为运动轨迹，归纳水动力学条件与鱼类个体趋流行为间的相关关系，揭示趋流行为触发后的鱼类个体运动规律。在仿生态鱼道优化技术方面，开展了新疆某拦河引水枢纽工程仿生态鱼道水力学模型研究，建立了鱼道所在河段二维水动力学模型，评价鱼道设计方案进出口布置方式生态适宜性，提出优化建议；开展仿生态鱼道内部结构合理性评估与试验研究，进行了鱼道设计方案水力学特征评价，进行仿生态鱼道单元组合物理模型试验，建立了仿生态鱼道单元组合物理模型；建立了鱼道进口段的三维水动力模型，测试及模拟仿生态鱼道的流量、流速和水深；评价了典型区段内部结构及断面形态生态适宜性评价，并提出了优化建议方案。

另外，研究了恢复河流自然生态的拆坝效应的评估理论和方法，在系统调查分析国内外拆坝研究技术成果与典型案例的基础上，针对辽河流域水工程存在的问题，以生态问题为核心，研究形成了水库报废(拆坝)生态环境影响评价指标、评价标准与评价方法，并研究提出了拆坝前后评价指标的调查监测方法。依据上述技术方法，对辽宁省辽河流域228座小(二)型水库的系统调查分析与复核，明确了辽河流域水工程布局优化调整方案涉及水工程的8方面问题，并制定了辽河流域2014年拆坝计划分解方案。针对示范拆坝工程，研究提出了拆坝生态修复技术方案与监测技术方案。

4 学科展望

4.1 新时期的科技新需求 随着流域水环境与生态问题的日趋复杂与面向流域水生态系统健康保护的高要求，流域水环境和生态学科研究将更加需要强调多学科、多要素的综合。理论研究方面，从单一的水环境过程研究，向水文过程、水环境过程与水生态过程耦合研究转变，从污染胁迫驱动下

的单一水体水环境演变研究，向流域水文水力学要素、水污染要素、河湖物理形态要素等多要素复合驱动下的水生态综合演变研究转变；技术应用方面，从解决单一水环境问题的单项技术的研发，向保障流域水生态系统健康的水生态保护与修复系统集成技术发展；工程实践方面，从局部水域水污染治理工程方案向流域综合保护与修复的整体解决方案过渡。

当前，我国社会经济发展进入新常态，努力建设美丽中国是我国今后很长时期内的重要任务，我国也已进入“有条件有能力解决生态环境突出问题的窗口期”。我国在河湖水生态问题存量，增量问题多，水利行业亟待完成向资源水利、生态水利的深刻转型，河湖生态保护与修复科技需求迫切。

(1) 水库生态改造需求巨大而突出。水库是应对我国水文时空分异突出、保障生产生活用水的关键措施，也具有改善生态流量保障程度的巨大潜能。我国已建有 98 460 座水库，但在以往强调生产生活用水保障的指导思想下，普遍缺少生态用水保障任务，也缺少生态流量泄放措施、鱼道、分层取水等生态友好型水工措施。为了释放水库在我国的水质安全、生态安全方面的潜能，有必要重视水库生态化改造，流域水环境与生态学则必须对其中蕴含的相关的科学、技术、管理问题提供坚实支撑。

(2) 生态流量保障任务艰巨而紧迫。水资源短缺、河湖生态用水挤占、水工程生态调度保障不足是制约河湖健康的关键。但是，我国在生态流量内涵定义方面尚未形成共识，同时由于河湖水生态台帐不明，河湖水生态保护目标的生态水文需求研究案例缺乏，国内采用的生态流量确定方法大多不具有普遍适用性，面向生态流量保障的生态调度与生态引水管理多属于应急措施，远未进入常态化。随着河湖水生态保护需求与公众关注程度不断提高，科学合理确定生态流量标准并有效保障将会更加迫切。

(3) 河湖生态修复与生态管护将会成为重要任务。随着大保护战略思想的持续深化与河长制及湖长制的深入推进，河湖生态修复与管护将成为河湖管理的重要任务，流域水环境与生态学必须及时跟进，并能提供适用的技术支撑。

4.2 学科发展目标与重点方向 针对新时期的科技新需求，流域水环境与生态学遵循“山水林田湖草生命共同体”与“水资源保护、水环境治理与水生态修复”“三水治理”要求，在流域水生态过程演变机理、流域水生态调查评价技术与河湖健康评价标准、生态流量标准与生态调度、河湖生态修复与生态管护等方面开展系统研究，形成流域水生态保护的系列技术标准，奠定在流域水生态研究方面的行业引领地位，建设流域水环境与水生态保护研究的国际一流研究所。

5 结语

2010 年以来，中国水科院水环境研究所在流域水环境与生态学研究方面，承担了大量国家及省部级重点项目，完成了大量重大工程的水环境与生态问题咨询任务，在水环境监测技术与标准、流域水环境与水生态过程演变机理与模型、流域水质目标管理与流域水环境综合治理技术、河湖健康评估与水生态保护修复技术等专业方向形成了丰硕的科研成果，发表各类学术论文近 600 篇，平均每年 60 篇左右，其中 SCI 论文占 1/5；获得发明专利和实用新型专利约 70 项，编制标准、规范 10 余项；获得各类科学技术奖近 50 项，其中省部级以上奖励 15 项。

在我国社会经济发展进入新常态，努力建设美丽中国的新时期，流域水环境与生态学将面临重要的发展机遇，水环境研究所将重点在流域水生态过程演变机理、流域水生态调查评价技术与河湖健康评价标准、生态流量标准与生态调度、河湖生态修复与生态管护等方面开展系统研究，全面建设成为流域水环境与水生态保护研究的国际一流研究所。

参 考 文 献:

- [1] 彭文启, 张祥伟, 杜霞, 等. 现代水环境质量评价理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 吕爱东, 宋万琦, 李镇西. 浅论水质监测的由来与发展[J]. 黑龙江水利科技, 2002, 30(3): 70.
- [3] 许建萍, 王友列, 尹建龙. 英国泰晤士河污染治理的百年历程简论[J]. 赤峰学院学报(哲学社会科学版), 2013, 34(3): 15-16.
- [4] 杨成立. 埃姆舍河流域治理模式对汾河治理启示[J]. 山西建筑, 2009, 35(31): 355-356.
- [5] 徐祖信, 廖振良. 水质数学模型研究的发展阶段与空间层次[J]. 上海环境科学, 2003, 22(2): 79-85.
- [6] 蕾切尔·卡逊. 寂静的春天[M]. 吕瑞兰, 李长生, 译. 长春: 吉林人民出版社, 1997.
- [7] 范春萍. 面对失控的世界, 人类必须做出抉择——为纪念斯德哥尔摩人类环境大会40周年而作[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2012, 12(2): 1-9.
- [8] TAYLOR S A, WAYLAND S. Federal Water Pollution Control Act Amendments of 1972[Z]. Pub. L. 92-500, 1977.
- [9] 章轲. 鲑鱼-2000计划: 莱茵河流域管理成功案例[J]. 世界环境, 2006(2): 62-65.
- [10] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 生态水工学进展与展望[J]. 水利学报, 2014, 45(12): 1419-1426.
- [11] 石秋池. 欧盟水框架指令及其执行情况[J]. 中国水利, 2005(22): 65-66.
- [12] 杨员, 张新民, 徐立荣, 等. 美国水质监测发展历程及其对中国的启示[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 86-91.
- [13] 周怀东, 廖文根, 彭文启. 水环境研究的回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(3): 215-223.
- [14] 段蕾. 新中国环保事业的起步: 1970年代初官厅水库污染治理的历史考察[J]. 河北学刊, 2015, 35(5): 61-65.
- [15] 李玉梁, 李玲. 环境水力学的研究进展与发展趋势[J]. 水资源保护, 2002(1): 1-6.
- [16] 倪浩清, 沈永明, 陈惠泉. 深度平均的 $k-\epsilon$ 紊流全场模型及其验证[J]. 水利学报, 1994(11): 8-17.
- [17] 高季章, 陈凯麒, 朱耀泉. 生态环境友好的水电工程建设体系的关键科技问题[C]//联合国水电与可持续发展研讨会文集. 2004.
- [18] 陈凯麒, 王东胜, 刘兰芬, 等. 流域梯级规划环境影响评价的特征及研究方向[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 79-84.
- [19] 周怀东, 彭文启, 杜霞, 等. 中国地表水水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4): 255-264.
- [20] 彭文启, 周怀东, 邹晓雯, 等. 三次全国地表水水质评价综述[J]. 水资源保护, 2004, 20(1): 37-39.
- [21] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2010年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010.
- [22] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2011年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.
- [23] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2012年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [24] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2013年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [25] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2014年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [26] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2015年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [27] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2016年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [28] 中国水利水电科学研究院. 水环境研究所2017年度科研成果汇编[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.

- [29] 周怀东, 彭文启, 王世岩, 等. 水污染与水环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [30] 彭文启, 刘晓波, 周洋, 等. 河湖水污染事件应急预警预报方法与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

Review and prospect of progress in water environment and water ecology research

PENG Wenqi, LIU Xiaobo, WANG Yuchun, ZOU Xiaowen

(*Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: Water environment and ecology is a comprehensive science that studies the interaction between watershed activities and the water environment and water ecology evolution of the basin, providing basic theory and methods for the construction of water ecological civilization, with closely relation to the disciplines such as hydrology, hydraulics, ecology, environmental science and technology, and resource science and technology. The problems including water shortage, water ecological damage, and water environmental pollution, which have become increasingly serious since the 1980s, have significantly driven the formation of water environment and ecological disciplines. A brief review of the development of water environment and ecology is presented, and the main research achievements of the Department of Water Environment(DEW) in China Institute of Water Resources and Hydropower Research(IWHR) since 2010 are introduced as following aspects. (1) Water environment monitoring technology and standards. On the basis of the previous research achievement such as monitoring technologies for natural water quality and heavy metals, trace and ultra-trace toxic and harmful organic pollutants, new progress has been made in the development of water environment monitoring and analysis techniques and standards, reference materials for water environment monitoring, health risk assessment methods for water source, water pollution emergency warning and forecasting system, and new technologies and equipment for water environment monitoring. (2) The evolution mechanism and model of water environment and water ecological process in basin. A series of innovations have been achieved, including the evolution mechanism and effects of heavy metal pollutants in large reservoirs, the characteristics and driving mechanisms of migration and transformation of source waters, the variation of ecological and hydrological processes, the ecological response mechanism of rivers and lakes, and the water environment and ecological model of watershed. (3) Watershed water quality management and water pollution prevention technology. Water function zone water quality assessment guidelines, and watershed total maximum load control technology system are formed. The watershed comprehensive planning technology of water pollution control and the lake reservoir sediment pollution assessment and ecological dredging scheme development technology are proposed, and the biological slow water treatment technology and equipment are put forward. (4) River and lake health assessment and water ecological protection and restoration technology. The river and lake health assessment standards, the river-lake water system ecological connectivity technology, ecological flow determination technology, water quality and water quantity joint dispatching technology and water ecological restoration technology were formed. Finally, the scientific and technological needs of water environment and ecology in the new era are analyzed, and the future prospects of water environment research is proposed.

Keywords: watershed; water environment; water ecology; water environmental monitoring; water environmental modeling; water functional zone; river and lake health

(责任编辑: 杨虹)