

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.001

水资源保护的新内涵：“量-质-域-流-生”协同保护和修复

王 浩, 王建华, 胡 鹏

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:随着人类社会经济发展及其对于水资源系统干扰的逐步加强,水资源保护工作的重要性日益凸显,其定义和内涵也在不断演变,并呈现出流域化、系统化、生态化的特征。在定量评价人类活动对于我国水资源系统在水量消耗、水污染排放、水空间挤占、水通道阻隔等方面干扰,并进而造成水生生物多样性降低的基础上,继承和发展传统水资源保护内涵,提出了新时期以“量-质-域-流-生”协同保护修复为核心的流域水资源保护新理念,明晰了流域水资源保护的体系框架、重点工作和评价指标,提出了相较于现有技术体系未来尚需要重点研究的流域水资源保护关键技术。流域水资源保护是传统水资源保护工作的升级,对于新时期水利改革发展和美丽中国建设将具有重要促进意义。

关键词:水资源保护;系统治理;生态流量;水域空间;水系连通

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0001-09

New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration//WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China*)

Abstract: With the development of human society and economy and its gradual strengthening of interference to the water resources system, the importance of water resources protection is becoming increasingly prominent, its definition and connotation are constantly evolving, showing the characteristics of watershedization, systemization, and ecologicalization. Based on the quantitative evaluation of human activities interference with China water resources in terms of water consumption, water pollution discharge, water space occupancy, and water channel barriers, which result in the reduction of aquatic biodiversity, this paper inherits and develops the traditional water resources protection connotation, proposes a new concept of river basin water resources protection in the new era with “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration as core, clarifies the framework, key tasks and evaluation indicators of river basin water resources protection, and proposes the key technologies of river basin water resources protection that need to be studied in the future compared with the existing technical system. The protection of river basin water resources is an upgrade of traditional water resources protection, which has important promotion significance for the reform and development of water conservancy in the new era and the construction of a beautiful China.

Key words: water resources protection; systematic management; ecological flow; water space; hydrological connectivity

人类保护水资源的历史可以上溯到公元前 4 世纪,当时波斯地区居民就有不许向河流撒尿、吐痰,不许在河里洗手等规定^[1]。随着社会经济的发展,水资源保护的内涵也在不断丰富和拓展。20 世纪 80 年代出版的《水资源保护手册》,是我国第一部水资源保护方面的手册,该手册未给“水资源保护”下明确的定义,从涉及内容来看,主要关注的是水质保

护,包括天然水质、水污染、水质监测评价、水质模型和水环境容量、污水处理和再生利用等内容,少部分水生生物的内容也集中在生物毒性分析和生物学水质评价方面^[2]。

2000 年出版的《中国资源科学百科全书》,对“水资源保护规划”的定义是“保护区域内水资源达到一定目标或水质标准的事先安排。其目的在于保

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401302,2017YFC0404503);国家自然科学基金(51625904);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B522017)

作者简介:王浩(1953—),男,中国工程院院士,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wanghao@iwhr.com

护水质,合理利用水资源。通过规划提出各自措施与途径,从而使水体质量符合要求,水源免于枯竭,充分发挥水资源的多功能效益”^[3]。可见,此时水资源保护的内涵从单纯水质保护向水质和水量双重保护转变。2004年出版的《中国水利百科全书》定义上进一步完善,指出“水资源保护”是“保持水资源可持续利用状态所采取的行政、法律、经济、技术等保护措施”,包含“水资源合理开发和水质保护”两个方面,但从具体展开的内容上,仍然主要局限于水质保护方面^[1]。此外,国家标准 GB/T 30943—2014《水资源术语》虽然是2014年发布,但其关于“水资源保护”的定义主要延续了《水文基本术语和符号标准(GB/T 50095—1998)》的内容,反映的主要仍是“防止水污染与可用水量日益减少”^[4]。

直到2013年,水利部制定出台的SL 613—2013《水资源保护规划编制规程》,才对“水资源保护”有了更为清晰和全面的定义,指出水资源保护是“为维护江河湖库及地下水体的水质、水量、水生态的功能与资源属性,防止水源枯竭、水体污染和水生态系统恶化所采取的技术、经济、法律、行政等措施的总和”^[5]。该定义有两方面的突破,一是明确将地下水纳入水资源保护范畴,二是首次将防止水生态系统恶化纳入水资源保护内涵。在具体内容上,除了常规的水质保护和点源面源污染控制外,还专门加入了水生态系统保护和修复、地下水资源保护、饮用水水源地保护等内容。但相比于水质保护,水生态系统保护和修复相关内容仍然较为单薄,且大部分内容只进行了原则性的规定,缺乏定量化的管控指标。

党的十八大以来,中共中央先后提出“节水优先,空间均衡,系统治理,两手发力”的十六字治水方针和山水林田湖草生命共同体思想,全面推行河长制、湖长制,强调水资源-水环境-水生态“三水融合”,长江大保护^[6-7]、黄河流域生态保护和高质量发展^[8-9]先后上升为国家战略,对于水资源保护的需求不断向流域化、系统化、生态化方向发展^[10]。在此形势下,有必要站在流域整体视角,秉承“自然-社会”^[11]复合生态系统理念,统筹陆域产水区、地表-地下汇水区、径流开发利用和散失区,重新审视新时期水资源保护的内涵。为了实现全面有效的水资源保护,首先需要明晰人类社会经济活动对水资源系统的影响和干扰存在于哪些方面。本文所称水资源系统,主要指水资源及其各种形式的赋存体,如河流、湖泊、地下水等。

1 人类活动对水资源系统的干扰

由于水的强极性、弱黏滞性、高热容和热传导

性、“冰轻水重”、无色透明但红外紫外光高吸收能力等特性,使得水成为地球所有生物体的基本组分和新陈代谢介质,成为工农业生产的基本要素,并为所有水生生物提供生存和栖息空间,同时水流还是地表环境塑造、物质能量输移和生物信号传递的基本形式,是人类精神和文化的重要载体。正是由于水资源具有的多维属性和功能,使得人类出于自身安全保障、经济社会发展、人居环境改善等方面的需求,对水资源进行了多种形式的开发利用和控导,包括地表地下的取水、直接间接的排污、水力发电、水产养殖、堤防护坡修建等。这些人类活动对水资源系统造成了复杂的综合影响,概括起来,主要包括水资源的消耗、水污染的排放、水空间的挤占、水通道的阻隔4个方面,并最终造成水生生物多样性的降低。

1.1 水资源的消耗

2018年,全国水资源总量27 462.5亿 m^3 ,用水总量6 015.5亿 m^3 ,占当年水资源总量的21.9%。其中,地表水资源供水量4 952.7亿 m^3 ,地下水资源供水量976.4亿 m^3 ,其他水源供水量86.4亿 m^3 。水资源开发利用造成的耗水量为3 207.6亿 m^3 ,总耗水率为53.3%^[12],耗水量仅占全国水资源总量的11.7%,但由于用耗水总量和强度的时间、空间分布不均,加之部分水利工程的不合理调度,造成我国河湖生态流量^[13]不达标问题突出,北方平原区仍然存在大面积地下水超采^[14]。

取长系列月均实测流量、天然流量的95%保证率最低流量和近10a日均流量的90%保证率最低流量3者中的较大值,并进行必要性和可行性修正后作为断面生态基流^[15]目标,对全国十大水资源一级区404个代表性断面近10a生态基流达标率进行了评价。按照“优良、合格、不达标”的3级评价标准,2018年达到“优良”标准(逐日流量全部达标)的参评断面比例为41.5%,达到“合格”标准(月均流量达标、日均不断流且连续不达标天数小于或等于7d)的断面比例为62.2%。从分流域情况来看,海河区、辽河区、淮河区达标情况较差,合格率均低于50%;东南诸河区、珠江区、长江区虽然合格率较高,但优良率有大幅度下降(图1),表明年内均存在较多的短时期生态基流不达标问题。从全国生态基流达标率的年际变化情况来看,2009—2018年,全国生态基流合格率、优良率均呈小幅上涨趋势,其中合格率从2009年的55.1%上升到2018年的62.2%,优良率从2009年的30.2%上升到2018年的41.5%(图2),表明随着此阶段我国最严格水资源管理制度的实施和用水总量的逐步控制,对河流

生态基流保障起到了较明显的促进作用。

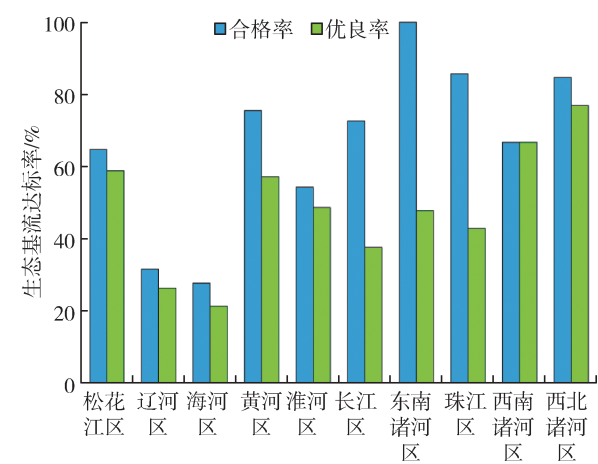


图1 2018年各水资源一级区生态基流达标情况

Fig.1 Ecological base flow compliance rates of each first-class water resources region in 2018

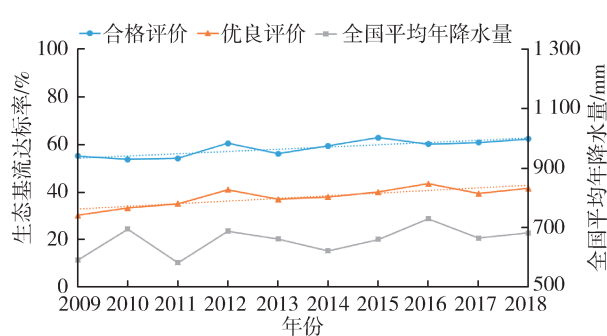


图2 2009—2018年全国生态基流达标率变化情况

Fig.2 Changes in ecological base flow compliance rates in China from 2009 to 2018

对全国 251 个具有重要生态保护目标的断面在鱼类集中产卵期(4—7 月)敏感生态需水达标率^[16]进行评价,全国整体达标率为 51%,辽河区、海河区、淮河区敏感生态需水达标率低于 40%。对 2006—2016 年全国 986 个地下水位监测井的数据进行分析,北方 12 省区平原区地下水超采面积为 25.8 万 km²,占全国平原区面积的比例为 9.71%,超采区域集中在河北省、山东省、河南省,分别占到了总超采面积的 27.7%、24.8% 和 17.6%。

1.2 污染物的排放

根据 2017 年第二次全国污染源普查数据,全国废污水排放总量 756 亿 t,另外有约 1300 亿 m³ 的农田退水,累计排放 COD 2144 万 t,氨氮 96.3 万 t,总氮 304.1 万 t,总磷 31.5 万 t,重金属 182.5 t^[17]。虽然全国约 2.7 万亿 m³ 的地表径流量具有较大的自净能力,但由于污染排在空间和时间上的集中性,以及污染物的累积效应,我国地表水和地下水环境不容乐观,突出表现在全国近 10 a 河流水质逐步好转,但作为水体末端汇集区的湖泊和地下水水质恶化严重。

根据《中国水资源公报》数据,2009—2018 年,全国水质评价河长从 15.4 万 km 增加到 26.2 万 km,Ⅰ~Ⅲ类水质河长占比从 58.9% 增加到 81.6%,劣Ⅴ类水质河长比例从 19.3% 降低到 5.5%,河流水质明显好转。但近 10 a,湖泊水质评价个数从 71 个增加到 124 个,评价面积从 2.5 万 km² 增加到 3.3 万 km²,富营养化数量比例从 64.8% 增加到 73.5%,2018 年Ⅰ~Ⅲ类水质湖泊数量占比仅 25%,而劣Ⅴ类水质湖泊占比达到 16.1%,湖泊整体水质较差。2018 年,对全国 8965 个地下水监测井水质进行评价,符合Ⅰ~Ⅲ类地下水质量的监测井 2463 个,占比 27.4%;Ⅳ~Ⅴ类的监测井 6502 个,占比 72.6%(图 3、图 4)。

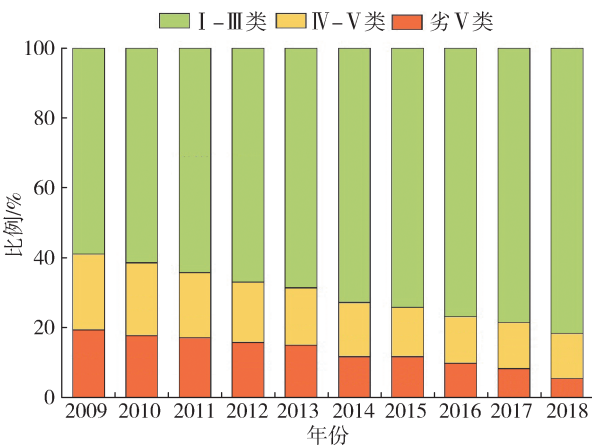


图3 2009—2018年全国河流水质评价结果

Fig.3 River water quality evaluation results in China from 2009 to 2018

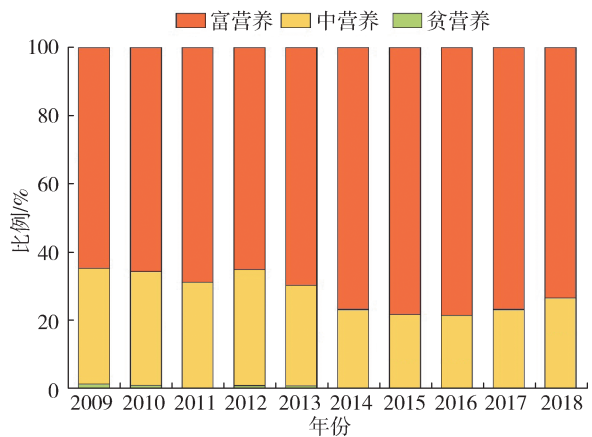


图4 2009—2018年全国湖泊富营养化情况

Fig.4 Changes in lake eutrophication in China from 2009 to 2018

1.3 水空间的挤占

本文所称水空间,指国土空间中土地利用类型为河流、湖泊、水库、滩涂、滩地、沼泽的区域,又称为水域空间。根据 Landsat-MSS 和 Landsat8 卫星遥感解译数据,1980—2018 年,全国水域空间面积从

36.02 万 km²降低到 34.41 万 km²,降低了 4.5%,其中减少的主要是沼泽、滩涂和滩地面积。虽然水域空间总面积减少幅度不大,但天然水域空间的侵占和转移情况突出。将 1980 年为水域空间且 2018 年仍然为水域空间的国土空间称为保留空间,则 1980—2018 年全国水域空间保留率为 79.2%,即超过 1/5 的天然水域空间转化为其他用途,其中,转化为旱地、草地、水田的面积最多,分别为 19 131 km²、18 018 km²和 14 250 km²,合计占水域空间转移总面积的 72.4%。十大水资源一级区中,水域空间保留率最低的是松花江区,仅为 54.5%,如图 5 所示。造成水域空间被侵占的主要原因有城镇化发展、粮食耕种面积增加、堤防修建等。

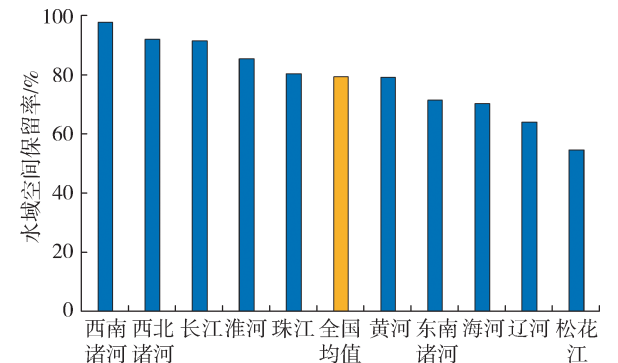


图 5 1980—2018 年全国及各水资源一级区水域空间保留率
Fig. 5 Water space retention rates in China and each first-class water resources region from 2009 to 2018

在水域空间总面积小幅降低的同时,全国水域斑块数量从 1980 年的 41.96 万个减少至 2018 年的 20.15 万个,减幅达到 52.0%(图 6)。由于水域斑块个数的大幅度衰减,导致 1980—2018 年全国水域空间斑块密度从 1.21 万个/km²下降至 0.61 万个/km²,呈现持续下降的趋势。相关变化趋势表明,我国水域空间中水库等大型斑块数量增加,而末梢水系、池塘等小型斑块数量大幅减少,这对水生生态系统结构

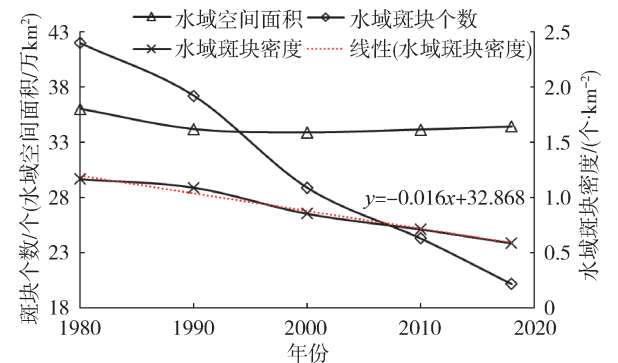


图 6 1980—2018 年全国水域空间面积、斑块数量和密度变化趋势
Fig. 6 Changes in water space area, patch number and patch density in China from 1980 to 2018

和功能稳定产生重要影响。

1.4 水通道的阻隔

水流蕴含着巨大的动能,既是水的通道,也是水生生物的迁徙通道,还是泥沙、营养盐等物质的输移渠道,同时,水流流速、水温的节律性变化,是鱼类洄游产卵等生命活动的重要信号^[18]。畅通的水流通道是地表物质流、能量流、生物流、信息流的基本载体。人类为了开发利用水资源及其动能等属性,不可避免需要建设大坝、闸门等拦水建筑物,造成水流通道的阻隔和河流生境的破碎化。根据第一次全国水利普查数据,1960 年,全国共有水库大坝、引水式水电站、节制闸、橡胶坝等拦河建筑物约 3.4 万座,而到 2018 年,拦河建筑物数量上升到约 22 万座。按照阻隔系数法,综合考虑所有拦河建筑物类型、规模对水流连通性的影响,对全国及各大流域河流水系整体连通性进行评价^[19],结果如图 7 所示。全国六级以上河流的整体连通性指数为每 100 km 1.87 个,处于“劣”(大于每 100 km 1.2 个)的状态。十大水资源一级区中,东南诸河区、珠江区、长江区、淮河区连通性最差,均大于每 100 km 3 个;西北诸河区是唯一为“优”(不大于每 100 km 0.3 个)的水资源一级区,松花江、西南诸河区处于“良”(每 100 km 0.3 ~ 0.5 个)的状态。

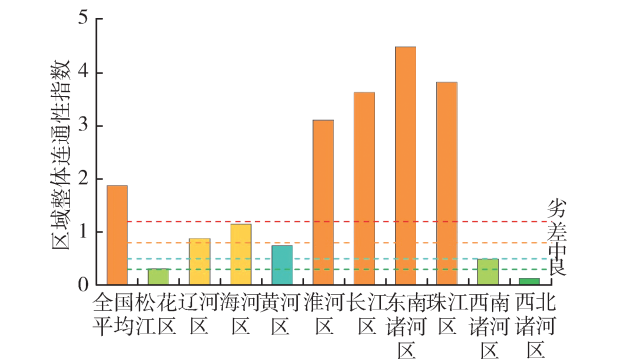


图 7 全国及各水资源一级区现状整体连通性指数
Fig. 7 Current state of overall connectivity index in China and each first-class water resources region

若仅对流域面积 1 万 km²以上的主要河流进行评价,并仅考虑大中型水利水电工程的影响,同时补充 2012—2018 年建成的大中型工程,在规模、类型基础上,进一步考虑工程建设位置对河流连通性的不同影响程度,全国及各水资源一级区 1960—2018 年的主要河流连通性指数变化规律如图 8 所示。全国主要河流现状连通性处于“差”(每 100 km 0.8 ~ 1.2 个)的状态,东南诸河区、珠江区、长江区处于“劣”的状态,松花江区主要河流连通性最好,是唯一为“优”的水资源一级区。

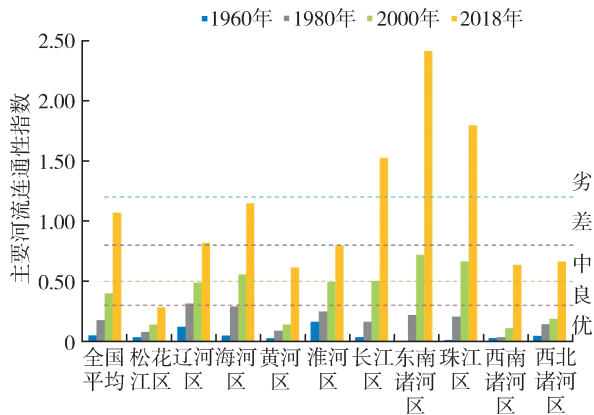


图8 1960—2018年全国及各水资源一级区
主要河流连通性指数变化

Fig.8 Changes in connectivity index of major rivers
in China and each first-class water resources
region from 1960 to 2018

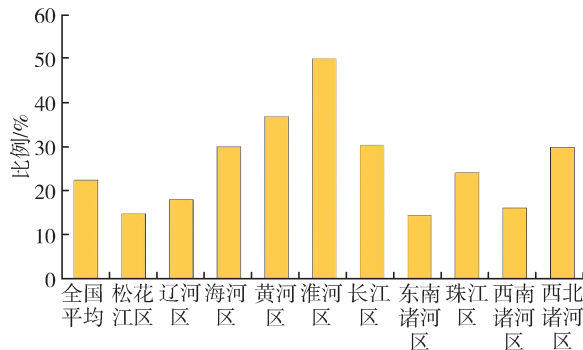


图9 我国不同流域特有鱼类受威胁比例

Fig.9 Percentage of threatened endemic fish
in different river basins in China

1.5 水生生物受威胁状况

受上述4方面人类活动干扰及其他因素的影响,我国淡水鱼类濒危程度日益加剧。《中国生物多样性红色名录—脊椎动物卷》对我国1443种内陆鱼类的受威胁情况进行了说明^[20],考虑到流域特有鱼类对反映流域水生生物受威胁状况的代表性更好,因此梳理了全国各流域特有鱼类的受威胁比例,结果如图9所示。十大水资源一级区中,流域特有鱼类受威胁比例最高的是淮河区,占比达50%;其次是黄河区,特有鱼类受威胁比例为36.8%;海河区、长江区和西北诸河区特有鱼类受威胁比例接近,都在30%左右。流域特有鱼类受威胁比例最低的4个区分别是东南诸河区、松花江区、西南诸河区和辽河区,比例分别为14.3%、14.8%、16.1%和17.9%。

2 流域水资源保护内涵与重点工作

2.1 流域水资源保护体系框架

人类活动对水资源系统的干扰主要体现在量(水资源的消耗)、质(水污染的排放)、域(水域空间的侵占)、流(水流连通性的破坏)4个方面,并进而造成水生生物多样性的衰退。传统水资源保护工作集中在水质保护和水源涵养方面。新时期随着水利工作改革发展,有必要站在流域视角,秉承系统治理理念,并进一步重视水生态系统结构和功能的整体恢复,从人类活动对水资源系统的多维干扰出发,重新定义水资源保护内涵。相较于传统水资源保护,新时期水资源保护的最大特征是强调流域整体的系统治理,因此可称之为“流域水资源保护”(图10)。所谓流域水资源保护,就是采取一系列保护和修复措施,使人类活动对流域水资源系统的干扰维持在水资源系统可承载范围之内,实现水资源的可持续利用,水资源可再生性、水环境质量、水生态系统健



图10 流域水资源保护体系框架与主要评价指标

Fig.10 Framework and main evaluation indexes of river basin water resources protection system

康是检验水资源保护成效的3个方面表征,其内涵体系框架与主要评价指标如图10所示。需要说明的是,本文所称“流域水资源保护”并不代表相关内涵只适用于流域层面的水资源保护工作,而是强调须站在流域整体视角进行水资源保护,其内涵、重点工作和评价指标对区域层面水资源保护工作同样适用。

2.2 流域水资源保护重点工作

2.2.1 水量层面

水量层面的水资源保护主要体现在加强水源涵养、河湖生态流量保障、地下水采补平衡等方面。水源涵养措施主要包括治理水土流失、保护自然植被、开展林草种植、减少源区人为活动等,一般集中在江河源头区和主要产水区。开展水源涵养的目的不是为了增加总径流量,而是为了增加源区林草植被和土壤层的水资源调蓄能力,坦化径流的极值过程,使源区起到“天然水库”的作用,从而增加枯水期基流量,降低汛期洪峰流量和流域水资源开发利用难度。研究表明,植被覆盖度每增加1%,区域洪峰流量可被削减5%~10%,枯水期流量可增加1%以上^[21]。

河湖生态流量是指为了维系河流、湖泊等水生生态系统的结构和功能,需要保留在河湖内符合水质要求的流量(水量、水位)及其过程。欧美国家将生态流量过程分为极端低流量(extreme low flows)、基础流量(base flows)、脉冲流量(high flow pulses)、小洪水(small floods)、大洪水(large floods)等。鉴于目前我国生态流量的保障还面临较大的体制机制与社会经济制约,现阶段主要考虑生态基流、敏感生态需水、汛期造床洪水3种组分。其中汛期造床洪水也可以看作是一种特殊形式的敏感生态需水,对于黄河等多沙河流尤为重要,其他流域可暂不作为重点。加强河湖生态流量保障的主要措施包括:全面开展河湖生态流量目标制定与分级考核;完善水利工程生态流量泄放设施,建立生态调度机制;实行流域与区域相结合的用水总量控制,加强江河水量分配和分季节用水总量控制;开展重点河湖湿地的生态补水,建立长效机制;开展生态流量的实时监测预警与调控保障。

在地下水方面,重点是开展超采区的综合治理,逐步实现地下水采补平衡和水位恢复;同时加强对地下水水量-水位的双控管理,维持地下水在合理水位,在干旱区支撑地带性植被生长,在滨海区域控制海水入侵,在灌区维护人工绿洲,同时避免土壤次生盐碱化。

2.2.2 水质层面

水质保护是传统水资源保护的核心内容,重点是将入河污染总量控制在水体纳污能力范围之内,

实现既定水质目标,对人体健康和生态系统不造成威胁。在传统水质保护工作之外,流域水资源保护强调几个方面的转变。

一是从纳污总量控制向“清水入河”转变。河湖水体本身具有一定的纳污能力,但若严格按照纳污能力来进行入河污染控制,由于面源污染等不可控因素的影响,往往水质并不能达到预期目标。从流域水资源保护角度,应尽可能实现污染物的源头减排和过程阻断,最大程度避免污染物的入河。主要措施包括工业园区“零排放”技术推广、废污水再生利用、种植业化肥农药减施和节水减排、畜禽养殖废弃物综合利用、入河前的湿地和缓冲带净化等。通过流域内各区域各子流域的“守土有责”和污染物“就地消纳和处理”,实现“清水入河”。

二是从化学指标为主向水温、DO、水质指示物种等理化生指标并重转变。以往对河湖水质的保护集中在COD、氨氮等化学指标上,水温、DO等与水生生物栖息繁衍密切相关的指标虽然纳入了GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,但未作为考核评价的重点。水温在鱼类繁殖过程中具有重要的信号指示、产卵刺激和积温发育功能,水利工程导致的下泄水温滞后、冷却用水造成的温排水热污染均会导致鱼类正常繁殖过程被打乱,影响鱼类繁殖和越冬成功率^[22],需要采取措施减缓其影响。DO浓度与水生生物的生存密切相关,其受污染程度、水体流动性等多方面因素的影响,是水体质量和生态友好性的重要表征指标,需要加强监测评价和控制。而利用水质敏感性指示物种对水体质量进行快速检测,也成为近年来水质监测评价的发展方向。

三是从水质提升向宜居水环境打造转变。水质保护的终极目的是不影响水体综合功能的发挥,传统水质保护重视各项评价指标的达标,而在新时期生态文明和“幸福河湖”建设^[23]背景下,增强城乡居民对河湖水体的满意度和亲近率,通过良好水环境为公众提供更多优质生态产品成为水资源保护新的内涵。苏州市在中心城区水体达到Ⅲ类水标准的基础上,开展“清水工程”建设,着力提升城区和主要景观水体的透明度,以“群众满意度”作为水环境核心评价指标,是城市宜居水环境建设的典范。对于农村地区,宜结合乡村振兴等工作,大力推进农村水系综合整治和水美乡村建设。

2.2.3 水域层面

水域层面保护重点是维持水域空间的数量、结构和功能的稳定。在数量方面,要科学划定水域空间保护边界,制定分区水域空间总面积目标指标。以水域空间保护边界为依据,对未经批准围垦湖泊

河道、非法侵占水域滩地、乱扔乱堆垃圾、弃置堆放物体等违规行为进行稽查、整治和清退,恢复被侵占水域,并综合利用卫星遥感、地面监测巡查等手段,建立动态监管体系,确保水域空间面积不减少。

在结构和功能方面,要加强对流域/区域水域空间组成进行调查评价和控制管理,包括天然-人工比例、永久性-季节性比例、河-湖-库-沼-滩结构、大-中-小斑块比例、纳入保护地体系空间占比等,以维持水域生境的多样性,同时对水域空间的最大斑块指数、景观连接度等指标进行评价和管控,确保水域行洪蓄洪、水源供给、净化水体、生物栖息、物质能量通道、文化娱乐等综合功能的发挥。此外,要通过设立禁采区、禁航区和禁航时段、限制通航强度等手段,降低采砂、航运等水域单一功能对其他功能,特别是水生生物生境功能的影响。

2.2.4 水流层面

水流连通性的保护主要体现在两个方面,一是加强已有阻隔的功能连通和恢复,二是对未来规划建设和运行的管控。在已有阻隔的功能连通方面,重点是加强河湖水系连通和水利工程过鱼设施的建设。要着力恢复河湖天然水力联系,通过水系连通、灌江纳苗、生态调度等形式,恢复河湖健康有序的生物流、物质流、信息流。对未开展过鱼设施建设的大中型工程,要因地制宜,选择适宜的形式进行改造和补建。对已建的大中型水利工程过鱼设施,要配套建设诱导设施或拦截设施,创造诱鱼适宜水流条件,满足鱼类行为习性和生理机能的基本需求,同时减轻水轮机或水泵等机械对鱼类卷吸的影响,提升过鱼效力^[24]。对量大面广的小型闸坝,要推广开展仿自然通道过鱼设施的建设,对有重大生态影响或经济效益低下的小型水电站,在科学论证的情况下予以拆除^[25]。

在新增阻隔管控方面,一方面要突破河流尺度纵向连通性评价存在的不足,开展流域层面水系连通性的整体评价,并基于鱼类资源分布和栖息洄游路线的调查,编制流域水系连通性保护整体规划,确定重点保护河段和支流;另一方面,对新建拦河建筑物要因地制宜规划建设过鱼设施^[26-27],对大江大河干流上确需建设的水利工程,要做好生态影响评价^[28-29],科学论证支流替代生境,并对相应支流进行保护修复,确保替代成效。

2.2.5 水生生物层面

量、质、域、流4个方面构成了水生生物的生境,而决定水生生物多样性或受威胁程度的因素,还有过度捕捞、物种进化等,这些因素在目前体制下已超过了水资源保护的内涵和范围。因此,从流域水资

源保护的角度,水生生物层面重点是做好两方面工作:一是加强重点保护物种的生态习性调查,包括鱼类“三场(产卵场、育肥场和越冬场)一通道”分布、不同生命阶段适宜水文水质条件等,建立并完善相应的数据库,不断扩大数据覆盖范围,以便更有针对性地为水生生物提供适宜生境,协调水资源开发利用与生态环境保护的矛盾。另一方面,要以生物完整性评价^[30]为主导,大力加强水生生态监测,并优先在我国大江大河及主要支流、重点湖泊建立水生生态监测网络。通过系统的水生生态监测评价,评估各项水资源保护措施的生态响应,及时调整保护策略和控制指标,促进水生生态系统健康稳定。

3 流域水资源保护关键技术

针对流域水资源保护的内涵和重点工作,在现有技术体系基础上,未来还须重点发展多项关键技术。

3.1 生态流量保障成效评估与适应性调整技术

目前关于生态流量目标的科学制定与调控保障已有大量的研究成果和技术方法,水利部也已发布了两批共186个断面的生态流量目标。而对于既定流量目标调控保障后的生态响应和成效,目前还缺乏系统的监测评估,需要大力推进,并根据评价结果对原有生态基流、敏感生态需水目标的适应性进行评价,形成生态流量目标的滚动修正技术方法,促进生态流量目标和管理体系的不断完善。

3.2 流域山水林田湖草系统治理技术

流域生命共同体是一个人与自然的复合系统,因此系统治理具有双重目标要求,一是维护流域生态系统健康,包括陆域和水域两大空间的生态系统,保障生态安全,维护生态功能;二是支撑区域经济社会高质量发展,通过生态产品价值实现与生态产业的健康发展,不断满足人民日益增长的优美生态环境和优质生态产品的需求。以往针对生命共同体单要素的治理研究多,如何充分发挥水在生命共同体中的纽带作用,实现多要素系统治理和“自然-社会”双重目标尚需要深入研究。

3.3 水域空间结构与功能优化调控技术

随着遥感、AI技术的发展,关于水域空间数量层面的动态监控技术已趋于成熟,而水域空间管控阈值及其结构与功能的联合优化技术还有很大发展空间。水域空间管控的重要阈值包括不同区域和类型河流滩地/主槽宽度比、不同区域城市建成区水域空间比例、无堤防河段蓝线划定范围、农垦开发区湿地/农田控制比例等。水域空间结构和功能联合优化的重点在根据水域空间的重点功能,对其结构组

成、景观连接度等性质的适宜性进行评价,提出水域空间保护修复的指导方案和方案,促进水域空间综合功能的发挥。

3.4 水系整体连通性评价与恢复技术

目前对河流纵向连通性的评价和调控研究主要以单条河流作为基本的评价单元,以具体工程的过鱼设施建设为重点恢复手段,而对河流连通性最为敏感的洄游鱼类,其栖息范围往往不局限于某一条具体河流,而是在整个流域水系内迁徙,因此,对河流连通性的评价和调控宜以水系为单元进行,一方面,需要研发水系整体连通性评价方法,对拦河建筑物造成的水系连通性降低程度进行科学评价;另一方面,要在高效过鱼设施建设运行技术基础上,研发流域干支流联合调控、支流替代生境等水系整体连通性保护恢复技术。

3.5 水生态高效传感设备与监测评价技术

针对目前水生态监测评价采样难、周期长、效率低的问题,研发以仿真鱼、水下机器人和人工智能为核心技术的水下综合感知技术与设备,研发水生态“一杆通”高效采样监测设备,研究水质生物检测、eDNA 等新型监测评价技术,并不断完善相应的物种和基因数据库,建立基于卫星遥感、雷达、移动设备的流域水资源、水环境、水生态“三水”智能感知技术体系,综合现有河湖健康评价标准,提出适应我国不同区域水生态特征的高效评价技术。

4 结 语

分析人类活动对水资源系统在水量消耗、水污染排放、水空间挤占、水通道阻隔方面的影响,提出了以“量-质-域-流-生”系统保护修复为核心的流域水资源保护新概念与内涵,并对其重点工作和主要表征指标进行了阐述,梳理了尚需重点研究的若干关键技术。流域水资源保护秉承流域整体视角、系统治理思想和生态改善目标,是传统水资源保护工作的升级,可为水利事业改革发展注入新的活力,并将大力支撑生态文明、美丽中国建设等国家重大战略。但是相关研究和实践工作依然任重道远,需要不同领域不同专业人员共同努力推进。

致谢:本文中人类活动对水资源系统干扰部分的定量评价结果,属于水利重大科技问题“保障水环境和水生态安全战略研究”项目成果,由项目组成员共同完成,在此表示感谢。受篇幅限制,相关详细评价过程未予以说明,如有需要,可与文章作者联系。

参考文献:

[1] 陈志凯. 中国水利百科全书水文与水资源分册[M]. 北

京:中国水利水电出版社,2004:261.

[2] 方子云. 水资源保护工作手册[M]. 南京:河海大学出版社,1988.

[3] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书[M]. 北京:中国大百科全书出版社,石油大学出版社,2000:348.

[4] GB/T 30943—2014 水资源术语[S].

[5] SL 613—2013 水资源保护规划编制规程[S].

[6] 卢纯.“共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):283-295. (in Chinese))

[7] 周建军,张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护,2019,35(2):1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (2):1-12. (in Chinese))

[8] 左其享,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020,36(2):1-7. (in Chinese))

[9] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护,2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):12-17. (in Chinese))

[10] 严登华,王浩,周梦,等. 全球治水模式思辨与发展展望[J]. 水资源保护,2020,36(3):1-7. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHOU Meng, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):1-7. (in Chinese))

[11] 褚俊英,王浩,周祖昊,等. 流域综合治理方案制定的基本理论及技术框架[J]. 水资源保护,2020,36(1):18-24. (CHU Junying, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Basic theory and technical framework for formulation of integrated watershed management plan [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):18-24. (in Chinese))

[12] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2017[R]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

[13] 张海滨,尹鑫,李伟. 我国河湖生态流量保障对策体系研究[J]. 水利经济,2019,37(4):13-16. (ZHANG Haibin, YIN Xin, LI Wei. System of ecological flow safeguard measures for rivers and lakes in China [J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(4):

- 13-16. (in Chinese))
- [14] 郭溪,吴泽宁,王慧亮. 区域农业生产系统用水正负效益分析及能值评估[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):1-5. (GUO Xi,WU Zening,WANG Huiliang. Emergy evaluation of positive and negative effects of water utilization in regional agricultural production system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(4):1-5. (in Chinese))
 - [15] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng,YUAN Shutang,YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):35-41. (in Chinese))
 - [16] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护,2020,36(2):8-12. (HOU Jun,PEI Jiaqi,HUANG Yuwei,et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):8-12. (in Chinese))
 - [17] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2020.
 - [18] 吕军,汪雪格,刘伟,等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J]. 水资源保护,2017,33(6):155-160. (LYU Jun,WANG Xuege,LIU Wei,et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2017,33(6):155-160. (in Chinese))
 - [19] 苏辉东,贾仰文,牛存稳,等. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):138-144. (SU Huidong,JIA Yangwen,NIU Cunwen,et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution[J]. Water Resources Protection, 2019,35(6):138-144. (in Chinese))
 - [20] 环境保护部,中国科学院. 中国生物多样性红色名录—脊椎动物卷[R]. 北京:环境保护部,中国科学院,2015.
 - [21] 王浩,胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题[J]. 水利学报,2020,51(9):1009-1014. (WANG Hao,HU Peng. Key issues of ecological conservation in the Yellow River basin from a water cycle perspective[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1009-1014. (in Chinese))
 - [22] 郑从奇,武玮,魏杰,等. 黄河下游支流大汶河鱼类多样性及影响因子分析[J]. 水资源保护,2020,36(6):31-38. (ZHENG Congqi,WU Wei,WEI Jie,et al. Fish diversity and its influencing factors in the Dawen River,a tributary of the lower Yellow River[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):31-38. (in Chinese))
 - [23] 陈新忠,杨君伟,陈如仪,等. 绿色金融支持幸福河湖建设初探[J]. 水利经济,2020,38(6):15-19. (CHEN Xinzhong,YANG Junwei,CHEN Ruyi,et al. Preliminary study on green finance supporting construction of happy rivers and lakes [J]. Journal of Economics of Water Resources,2020,38(6):15-19. (in Chinese))
 - [24] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):240-245. (MAO Jingqiao,DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(3):240-245. (in Chinese))
 - [25] 胡苏萍,徐灿灿,李弘. 美国退役坝拆除背景与原因剖析[J]. 水利水电科技进展,2017,37(1):43-49. (HU Suping,XU Cancan,LI Hong. Anatomy of dam removal in the United States of America[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(1):43-49. (in Chinese))
 - [26] 金志军,单承康,崔磊,等. 过鱼设施进口及吸引流设计[J]. 水资源保护,2019,35(6):145-154. (JIN Zhijun,SHAN Chengkang,CUI Lei,et al. Design of entrance and attraction flow of fish passage facility[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):145-154. (in Chinese))
 - [27] 温静雅,陈昂,曹娜,等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):49-55. (WEN Jingya,CHEN Ang,CAO Na,et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5):49-55. (in Chinese))
 - [28] 邹家祥,翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护,2016,32(5):136-140. (ZOU Jiaxiang,ZHAI Hongjuan. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection, 2016,32(5):136-140. (in Chinese))
 - [29] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196. (XUE Lianqing,ZHANG Hui,ZHANG Luochen,CHI Yixia,SUN Chao. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):189-196. (in Chinese))
 - [30] 刘凌,朱燕,李博韬,等. 基于MBFG分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):13-20. (LIU Ling,ZHU Yan,LI Botao,et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):13-20. (in Chinese))

(收稿日期:2021-02-07 编辑:彭桃英)