

王旭, 王永刚, 武大勇, 等. 北京市河流水生态健康时空异质性及改善路径研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 47–53. [WANG Xu, WANG Yonggang, WU Dayong, et al. Study on Temporal and Spatial Heterogeneity of Aquatic Health and Improvement Paths of Rivers in Beijing[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 47–53. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.009.]

北京市河流水生态健康时空异质性及改善路径研究^{*}

王旭^{1,2}, 王永刚¹, 武大勇², 毕吴瑕³

(1. 北京市环境保护科学研究院 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037;

2. 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹), 河北 衡水 053000;

3. 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: 河流生态系统是人类社会得以生存与发展的基本条件, 河流水生态健康对保障区域水安全, 避免水灾害具有重要意义。随着城市化的不断推进, 河流生态系统面临着巨大挑战, 水生态风险及灾害呈现广发、频发和深发态势。通过汇总北京市五大流域河流水生态健康状况评估相关研究, 识别区域水生态系统主要问题, 诊断水生态健康问题产生的原因。结果表明, 北京市河流水生态系统健康状况具有较强的时空异质性。空间上, 各流域河流水生态健康状况为潮白河>永定河>蓟运河>清水河>北运河。上游河段水生态健康状况好于中下游, 山区段河流好于平原段。水资源短缺引起的河流生态基流不足、水污染物超量排放造成的水质不达标、粗放式河流水利工程建设、河流水土资源的不合理开发以及河流植被缓冲带的不足等是造成河流水生态健康问题主要原因。并针对病因提出河流水生态健康目标导向的改善路径, 以期北京市及其他北方缺水城市河流水生态健康改善及水安全保障提供参考。

关键词: 河流; 水生态健康; 异质性; 改善路径; 北京市

中图分类号: X171.1; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)02-0047-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.009

河流作为地球的大动脉, 在相应的地理、气候及水文条件下演变成一个自然完整和谐的生态系统^[1], 其健康状况对保障水安全, 规避水灾害风险具有至关重要的作用^[2]。良好河流生态系统具有一定的稳定性、可持续性与自净能力, 为各种生物创造适宜的生存环境, 不仅使生物与生态系统和谐稳定发展, 同时也是人类生产生活的基石^[3]。从20世纪70年代开始, 在全球生态系统普遍退化的大背景下, 随着人类对生存环境的依赖, 水生态系统健康理念逐渐被人们所关注^[4]。河流生态健康的恶化, 会引发水灾害、水安全问题发生, 进而产生包括生命进化或消亡在内的一系列问题。随着我国工业化和城镇化进程的加快, 水资源供需矛盾严重, 加上自然灾害的频发, 人类对河流系统的干扰和损害也越来越大, 表现为河流断流、水体污染、水土流失、河岸带侵占、生物多样性丧失等一系列生态问题, 直接影响了河流功能的正常发挥和永续利用, 使流域的社会、经济和生态环境安全受到严重威胁^[5]。

北京市地处海河流域, 近年来水环境质量总体有所好转^[6], 但由于长期在人口基数大、城市

规模扩张、水污染物排放、水土资源不合理开发和水资源短缺等问题的累积作用下, 北京市河流生态问题依然严重, 水生态健康问题已成为制约区域社会发展、造成水安全、水灾害风险的重要因素^[7]。文本通过综述北京市五大水系生态健康状况评估相关文献, 识别区域水生态系统主要问题, 进一步诊断水生态健康问题产生的原因, 并以水生态健康为目标提出应对水生态问题的改善路径, 以期北京市及其他地区水生态健康修复以及水灾害风险规避提供参考。

1 北京市河流水生态健康状况

1.1 河流水生态健康状况

(1) 潮白河水系

潮白河水系从空间上分为密云水库上游潮河、白河流域以及密云水库下游潮白河流域。上游潮河、白河为地表水源地, 下游潮白河流域为再生水补给型城市河流。对潮白河流域河流水生态的

^{*} 收稿日期: 2020-09-29 修回日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409267); 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)2019年度开放基金(hk1k201913)

第一作者简介: 王旭(1987-), 男, 汉族, 河北新乐人, 助理研究员, 主要从事河流生态健康和生态风险管理研究。

E-mail: wangxu8568658@163.com

通讯作者: 王永刚(1978-), 男, 汉族, 四川资阳人, 研究员, 主要从事河流生态健康和生态风险管理研究。

E-mail: edward8848@163.com

研究始于 20 世纪末，主要基于浮游动植物、水生植物等水生生物调查，评估河流水质状况，但未涉及到河流水生态系统健康状况的评价^[8]。河流水生态健康评估近些年来才有报道。研究表明，上游白河、潮河水生态健康状况处于相对健康状态^[9-12]。怀柔水库流域河流也处于相对较健康状态^[13]。与之相比，下游潮白河流域河流整体处于不健康状态^[14-15]（表 1）。

（2）北运河水系

北运河是北京市的五大水系中唯一发源于北京市境内的水系，是北京市人口最多、城市化水平最高的流域^[16]。作为北京市的主要排洪通道，北运河每年承纳北京市区约 90% 的排洪量，其生态环境状况相对较差，严重制约了流域内社会经济的可持续发展。大量学者研究表明，北运河流域水生态健康相对较差（表 2），基本处于“较差 - 亚健康”状况^[17-21]。

表 1 潮白河流域河流水生态健康评价方法及结果

河湖	评价方法	评价结果	文献
密云水库	基于水生生物群落结构调查，评估和预测水体的富营养化及水质状况	密云水库水体从中营养向富营养发展	杜桂森，2001 ^[7]
白马关河	构建了北京北部山区河流水生态健康评价指标体系，包含 1 个目标层、6 个准则层指标、23 个指标层指标，将河流健康分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态五个等级	全河段处于亚健康与不健康等级的河段占比较大，占调查河段的 2/3	王志刚，2016 ^[11]
白河、安达木河	基于河流（近）自然状态评估河流健康状况	白河干流 57% 河段处于健康或亚健康状态，安达木河处于亚健康及以上河段比例为 40%，汤河为 66%	高宇婷，2014 ^[10]
白河、潮河	构建了涵盖水域生境结构、水生生物、生态压力和陆域生态格局与功能、生态压力 5 大类 13 项指标的评价指标体系，开展了密云水库上游白河和潮河流域生态健康评价。	白河和潮河流域的健康状态整体处于良好等级	徐菲，2017 ^[12]
潮白河下段	从河流水文学、物理构造特征、河岸带状况、水体污染状况以及水生生物等 5 个方面，提出了 14 个河流生态系统健康评价指标	潮白河生态系统健康处于中等健康状态	张可刚，2005 ^[9]
潮白河下段	开展底栖动物多样性调查，用 IHB 指数和 Shannon-Wiener 多样性指数评价健康状况	顺义城北减河、潮白河水生态状态堪忧	王燕华，2009 ^[14]
潮白河下段	建立以水量、水质、水生生物、河岸带、形态结构、社会功能 6 大类别 14 个指标评价体系，按照“病态、不健康、亚健康、健康、很健康”5 级评价标准，进行了生态系统健康评价。	潮白河处于不健康状态	陈毅，2011 ^[15]
怀柔水库	建立水文地貌、理化指标和生物 3 大要素 25 指标河湖生态健康评价指标体系	怀柔水库流域生态系统健康状况相对较好，水生态健康状态处于中等	孙峰，2017 ^[13]

表 2 北运河流域河流水生态健康评价方法及结果

河流	评价方法	评价结果	文献
北运河	指标体系包含河流物理结构特征、河流生态水文特征和社会经济指标 3 个一级指标和 15 个二级指标，将河流健康状况划分为健康、基本健康、亚健康、病态、消亡 5 个等级	北运河水生态系统健康已经处于三级（亚健康）状况	解莹，2008 ^[16]
温榆河	评价指标包括河流水环境状况、河流生物状况、河流形态结构、河岸带状况 5 个方面，指标层包括月平均径流量的变化、水温的季节变化等 21 个指标	温榆河水生态健康状况均为亚健康	尤洋，2009 ^[17]
北运河	建立了水量、水质、生物、连通性和防洪标准 5 个评价指标，分为濒于崩溃、病态、亚健康、基本健康和健康 5 级别	北运河生态处于亚健康状态	李文君，2011 ^[18]
温榆河	建立了底栖动物完整性指数（B-IBI）方法，确定了健康、亚健康、一般、较差和极差 5 个档次	温榆河 27.3% 河段处于健康状态，9.1% 河段处于亚健康状态，13.6% 河段处于一般状态，50% 河段处于较差和极差状态。	杨柳，2011 ^[21]
北运河	建立了水文、水环境、形态结构、河岸带、水生生物的 5 个子系统 15 个评价指标的北运河河流生态健康指标，	北运河北京段河流生态系统健康状况为亚健康	宋刚福，2012 ^[19]
温榆河、北运河、凉水河	建立水文地貌、理化指标和生物 3 大要素 25 指标河湖生态健康评价指标体系，确定了优良中差劣五个等级。	北运河各监测断面水生态状态综合评价结果处于劣等	孙峰，2017 ^[13]
北运河	选取涵盖水生生物、水文、水质和栖息地的 22 个候选评价指标，确定 I 级（健康）、II 级（亚健康）、III 级（一般）、IV 级（较差）和 V 级（极差）	25 个样点中，有 12% 为 I 级和 II 级，36% 为 III 级，超过 50% 为 IV 级和 V 级。	顾晓昀，2018 ^[20]

表 3 永定河流域河流水生态健康评价方法及结果

河流	评价方法	评价结果	文献
官厅水库	建立水文地貌、理化指标和生物 3 大要素 25 指标河湖生态健康评价指标体系, 确定了优良中差劣五个等级	官厅水库水生态健康状况处于中等, 健康状况为一般	孙峰, 2017 ^[13]
永定河流域	采用底栖动物完整性指数(B-IBI)方法评价永定河水系生态健康状况, 按照健康、亚健康、一般、较差和极差的评价标准	永定河三家店水库前断面水生态健康状况为一般, 官厅水库水生态健康为状态健康	孔凡青, 2016 ^[23]
永定河流域	选取河流的水环境功能、防洪效益功能、生态效益功能和支持利用功能 4 方面 16 个具体评价指标	永定河水系河流生态系统整体健康状况处于“较差”“差”水平, 尚不能满足河流生态系统一般需求	曹宸, 2018 ^[24]

表 4 大清河流域河流水生态健康评价方法及结果

河流	评价方法	评价结果	文献
拒马河	基于河流(近)自然状态评估河流健康状况	拒马河流域河流处于(近)自然状态河流比例为 17.8%, 河流健康状况较好的河段比例相对也较低	高宇婷, 2014 ^[10]
拒马河	建立了包括生态支持、输水泄洪、水质净化和景观文化四项功能 13 个指标的山区河流生态健康评价指标体系	拒马河处于相对健康状态, 但有向亚健康和受损状态发展的趋势	刘培斌, 2016 ^[27]
拒马河、小清河、大石河	选取河流的水环境功能、防洪效益功能、生态效益功能和支持利用功能 4 方面 16 个评价指标	拒马河保持“健康”至“亚健康”的状态, 其中 31.3% 样点达到“健康”水平; 小清河介于“亚健康”至“一般”状态; 大石河处于“较差”与“差”的状态, 有 45% 的样点健康状态低于“一般”健康水平	曹宸, 2018 ^[24]

表 5 蓟运河流域河流水生态健康评价方法及结果

河流	评价方法	评价结果	文献
海子水库	基于浮游植物群落特征以及多样性评价	海子水库水体夏季已呈现富营养化状态	陈晓江, 2015 ^[29-30]
海子水库	建立水文地貌、理化指标和生物 3 大要素 25 指标河湖生态健康评价指标体系	海子水库水生态健康状态为中等	孙峰, 2017 ^[13]

(3) 永定河水系

永定河为海河水系最大的一条河, 也是北京的第一大河, 被誉为母亲河。20 世纪 70 年代以来, 由于把永定河水系主要作为泄洪和排污河道, 忽视了其生态涵养的功能, 使得永定河流域生态环境逐步恶化。永定河流域河流水生态评价工作主要集中在 2 个方面, 一是基于水生生物群落结构调查的水生态评估^[22], 二是通过构建水生态健康评价指标或基于生物完整性评价河流健康状况。永定河流域水生态健康评估工作从近些年才开始, 研究表明永定河官厅水库、三家店水库等山区河流水生态健康处于中等一般状况, 永定河平原段水生态健康状况整体处于“较差”和“差”水平^[13,23-24](表 3)。

(4) 大清河水系

大清河水系位于白洋淀流域上游, 其水生态健康状况对保障下游雄安新区水生态环境安全有至关重要作用。21 世纪初学者从水生生物群落调查方面开展了大清河流域的水质及水生态评价工作^[25-26](表 4)。近年来开展了大量水生态健康评估工作, 研究结果表明大清河流域河流整体保持“健康”至“亚健康”的状态, 但有向亚健康和受损状态发展的趋势^[10,24,27]。

(5) 蓟运河水系

蓟运河水系(北京段)有水河流包括海子水库、

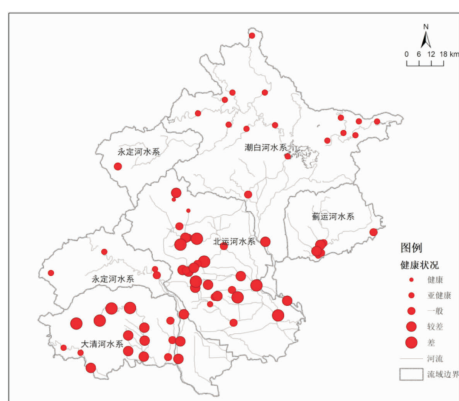
洳河下段、沟河下段以及大龙河、金鸡河、小龙河等支流。河道补水主要为污水处理厂退水, 加上沿途污染排放, 水生态环境状况堪忧^[28]。蓟运河(北京段)目前研究相对较少, 主要集中在海子水库, 研究表明海子水库夏季会已呈现出富营养化状态^[29-30], 其水生态健康状态为中等状态^[15](表 5)。

1.2 河流水生态健康空间分布

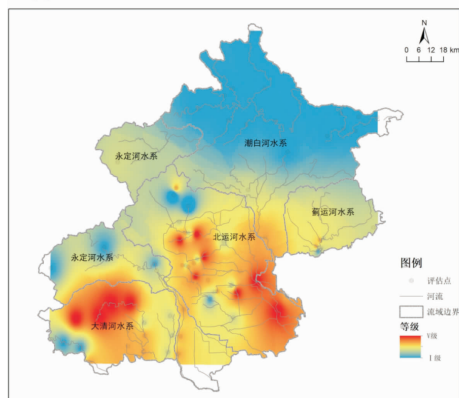
北京市各水系河流水生态健康评估工作集中在 2013 年之后, 在不考虑时间尺度和研究方法的不同, 汇总有效的监测评价点位共计 74 个。依据对各河流健康状况描述, 采用 5 分法确定各点位水生态健康状况等级(表 6)。北京市河流水生态系统健康监测点位及评价等级如图 1a 所示。在 74 个采样点位中, 2 个为 I 级(健康), 占点位总数的比例为 2.7%; 22 个为 II 级(亚健康), 占 29.7%; 18 个为 III 级(一般), 占 24.3%; 21 个为 IV 级, 占 28.4%; 11 个为 V 级, 占 14.9%。从各流域来看, 北运河水系和大清河水系河流生态系统的健康状况总体较差; 中部和东南部地区的健康等级普遍较低, 西北部地区的健康等级相对较高。

表 6 河流生态系统健康评价标准

健康状态	健康	亚健康	一般	较差	差
评价等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级



(a) 北京市河流水生态健康监测点位及评价等级



(b) 北京市河流水生态健康空间分布

图1 北京市河流水生态健康评价结果

基于反距离加权法 (inverse distance weighted, IDW) 对北京市各流域河流水生态健康状况进行插值运算, 得到北京市河流水生态健康空间分布状况, 如图 1b 所示。整体上看, 河流水生态系统健康状况具有较强的空间异质性, 健康等级较高的地区主要分布在流域上游, 而中下游地区的健康等级则较低。总体上, 各流域河流水生态健康状况位潮白河 > 永定河 > 蓟运河 > 清水河 > 北运河。每个流域水系中, 不同河流以及同一河流不同河段也表现出了较强的空间异质性。其中, 潮白河水系中, 密云水库上游潮河、白河流域河流水生态健康状况普遍较好, 而中下游河段水生态健康状况相对较差; 北运河水系中, 水系上游地区, 如十三陵水库、德胜口等河段位于远离北京市中心的西北部昌平区山区, 受人类活动影响较弱, 其河流生态系统健康处于相对原始的未开发或半开发状态, 从而形成了健康等级较高的集中区, 而中下游城区段, 由于高强度城市化开发等因素, 河流水生态健康状况相对最差, 如清河和通惠河干流的健康状况普遍较差。另外, 从图 1b 中可以看到, 北运河流域部分城区河段如凉水河, 其水生态健康状况相对其他城区河流相对较好, 处于亚健康的状态。这主要与近年来凉水河的水生态系统修复有关, 通过实施污水截留、河道生态修复以及加大水源补充等工程, 使得凉水河水生态状况得到了明显的改善^[31]; 永定河水系上游段水生态健康状况好于中下游; 大清水水系中, 拒马河与小清河的河流生态系统健康状态远优于大石河, 而拒马河上游山区段状况好于下游平原段。

1.3 河流水生态健康时间分布

密云水库上游潮河、白河流域河流水生态健康的研究主要集中于 2013 年后, 评价结果表明潮河和白河各流域水生态健康良好, 处于“健康”和“亚健康”状态, 河流中大型底栖动物群落结构较为复杂, 多样性较高, 且以清洁指示生物为主^[32]。潮白河中下游河流水生态健康从 2000 年的“一般”状态到 2011 年的“较差”状态, 其水生态健康状况十年内呈现一定恶化趋势; 北运河流域十三陵水库、昆明湖等湖库水生态健康状况从 2011 - 2017 年均处于亚健康状态, 基本保持不变; 北运河流域其他河流水生态健康状况从 2008 年的“一般”到 2015 年的“差”再到 2017 年的“亚健康”, 北运河水生态健康经历了从一般 - 较差 - 一般的变化趋势。这与北运河水系水环境质量不断向好有直接关系, 而目前影响北运河流域河流水生态健康的主要因素也从之前的水质指标转变成水生生物多样性指数^[20,33]。永定河水系中官厅水库水生态健康状况呈现逐步改善趋势, 平原段河段呈现退化趋势; 大清水水系由于受水资源过度开发、闸坝控制等要素影响的加剧, 其水生态健康状况呈现出从健康向亚健康和受损状态发展的趋势。

2 水生态健康问题诊断

河流水生态健康评估的目的是通过评价结果反馈河流水健康问题原因, 从而能够提出有效的河流生态修复措施, 保障河流生态安全。导致河流水生态健康问题的原因除自然演变 (内源性因素) 造成的衰退外, 外界干扰与胁迫 (外源性因素), 如极端自然灾害、工程建设、排污、捕捞等变成为主要因素。当外界胁迫长时间、高强度的作用于河流生态系统且超出其承受能力时, 河流的状态及各项功能的发挥都会受到影响, 从而产生健康问题^[11] (图 2)。

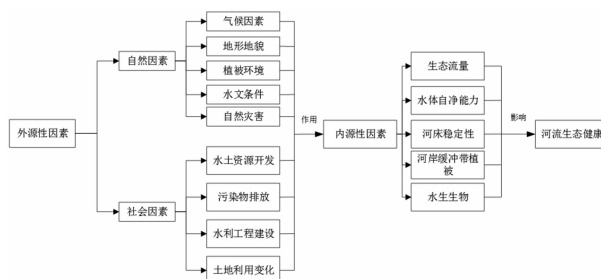


图2 河流水生态健康问题因素诊断

2.1 水资源短缺引发河流生态基流不足

水资源紧缺易引发水生态健康问题^[34]。河流季节性干枯水资源短缺引起的河流低流量运行状态对其水生态系统具有显著影响^[35]。以鱼类为例, 当河流流量减少一定程度时, 鱼类的密度和生长密度会减小。进一步影响水生生物产卵、繁殖过程中信号的传递, 阻隔水生生物的迁徙, 改变了水生生物的食物链结构, 造成生态环境破坏, 进而加剧水安全和水灾害的威胁。

北京市水资源禀赋先天不足, 根据水资源公报显示, 2018 年, 北京市水资源总量为 $35.46 \times$

10^8 m^3 , 人均水资源占有量为 165 m^3 , 远远低于国际公认的 500 m^3 的极度缺水警戒线。由于水资源短缺引发水生态系统问题在北运河表现最为显著。北运河水系各河流发源于北京市内, 除雨水外, 河道主要水源为再生水的补给, 河道生态基流不足, 多个河流长期处于断流状况, 水生生物得不到连续性、持续性生产, 生态系统服务功能丧失。北京的缺水态势在南水北调中线工程通水后得到一定缓解, 但并没有根本改变北京的水资源紧缺形势, 水资源供需矛盾依然突出, 北京市河流生态基流仍然不足^[36]。

2.2 水污染物超量排放造成水环境质量不达标

水环境质量是评估河流生态健康状况的最重要指标之一。虽然河流生态系统具有一定的稳定性及自我恢复能力, 当河流水质受到严重污染时, 水生态系统中清洁物种无法生存, 水体生物多样性消失, 生态系统的稳定性会遭到了极大的破坏。近年来随着水污染防治力度的加大, 水环境质量稳步提升, 但水污染形势依然严峻, 主要存在部分雨污合流管网造成的污水直排、河道淤泥释放的内源污染物以及城乡结合部及农村地区污水处理率不足等不当、以及城市和农村面源污染等问题。五大水系中, 北运河水系问题凸显, V 类和劣 V 类水体比例仍高达 60%, 水质达标率不足成为影响河流生态系统健康的主要因素^[37]。

2.3 非生态型河道水利工程建设

任何水利工程都具有一定的两面性, 其给人类带来一定社会效益和生态效益的同时, 过度及不合理的水利工程建设也对河流生态系统稳定性造成一定破坏。水利工程建设多体现在 2 个方面, 一是挡水建筑物, 如水坝、水闸的建设; 二是河道两岸和河堤的硬质化。非生态型水利工程建设会破坏水流的自然控制系统, 破坏水流的自然流态, 割裂了水循环过程, 改变区域生态系统的物质基础, 影响了生物多样性, 进而对河流的生态系统产生一定负面影响^[38]。以北运河为例, 由于城市排水和防洪的需要, 部分河段河底及边坡为硬性护砌, 连通性差, 改变了其原有的自然景观, 破坏了河流两岸动植物的原有栖息地, 致使生境多样性逐日锐减^[39]。

2.4 水土资源的不合理开发

人类对河流水土资源的无序开发和过度利用也是导致河流生态系统问题的重要原因之一。河道两岸土地利用方式的改变以及河道中的人工挖沙、河滩取石等改变了径流流向并造成河床底质的迁移破坏, 打破了河流的自然连续性和生态系统的平衡性, 致使河流的水质恶化以及河流生境遭到破坏^[11]。人类对河流不合理的利用是影响上游潮河、白河流域河流水生态健康状况的主要原因之一^[13]。

2.5 河流植被缓冲带不足

植被缓冲带对保障河流栖息地质量、营造稳定的水生态系统具有至关重要的作用。综上所述可知, 山区河流水生态状况相对较好, 主要与其合理河岸植被缓冲带布局相关。城市河段在河流植被缓冲带建设方面仍存在一定不足。主要表现在 2 个方面, 一是缓冲带布局不合理, 缓冲带的分

布呈断断续续状态, 未能形成连续的体系, 使得缓冲带的功能下降。二是缓冲带的缺失现象严重。部分河段缓冲带很短或几乎没有, 且缓冲带植被生长状况较差, 物种单一, 覆盖度较低, 未能发挥其生态效应。

3 河流水生态健康目标导向的改善路径

3.1 河流水生态健康修复模式

河流水生态健康改善技术方法多样, 从技术性质方面可分为物理、化学和生物(生态), 从河流河道结构出发可分为护坡修复、河道景观修复和水质改善^[40]。本研究结合已有研究中北京市各河流生态健康评估选取的指标体系以及存在的短板, 结合北京市城市发展现状, 确定了水量、水质、生物和生境四方面北京市河流水生态健康改善路径。

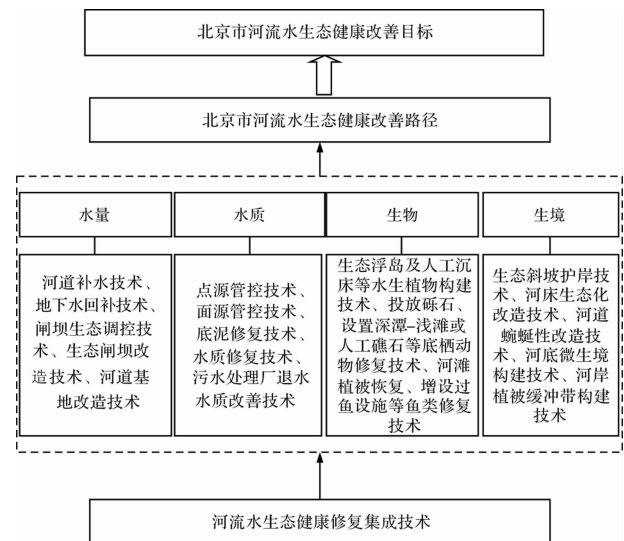


图3 河流水生态健康改善路径框架图

3.2 河流水生态健康改善措施

(1) 加大河流生态补水, 保障河流生态流量。生态流量是保护河流生态环境的最小流量。根据北京市历年水资源公报, 用水结构中生态用水比重逐年递增。2018 年环境用水 $13.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总用水量的 34%。未来应加大高质量再生水补给河流生态流量, 强化河道水流的生态管理及调度, 通过实时监测河流流量、水位, 实现对重点河流生态流量的控制管理, 有序推进常态化的细水急流调度, 进而达到保证不断流、保障河道生态用水需求, 逐步恢复河水的自净能力, 改善河流生态系统健康状况。

(2) 加强污水的治理力度, 持续改善水环境质量。在外源性因素中, 污水处理率是影响河流水生态健康的主要指标之一^[12]。北京市连续实施了两个“三年治污方案”以来, 全市污水处理率由 83% 提高到 92%。下一步应继续加大污水的治理力度, 全面解决城乡结合地区的污水处理能力不足问题。加强农村地区生活污水的收集和处理, 因地制宜的建设污水处理设施, 减少农村污水的

直排入河。

(3) 强化河流生态修复, 提升河流生态系统稳定性。逐步开展河流生态修复工程, 提高河流生态系统稳定性。基于系统良性循环的基础上设置生态浮岛、曝气设施, 优化配置水生动植物, 修复水生生态系统, 恢复水体自净能力。因地制宜地实施区域性、功能性湿地工程, 探索将蓄滞洪区、水质净化、生态修复有机结合, 以达到调节区域气候、净化并涵养水源, 促进河流水生态完整性与生境多样性的恢复^[39]。

(4) 开展生态水利工程建设, 营造良好生境状况。从河流水生态健康的角度开展水利工程建设和管理。在开展河道整治过程中, 应避免“三面光”硬质河道, 考虑到天然河槽是一个动态且多样化的生态系统, 根据河道的地貌类型, 构建深潭、浅滩、急流、缓流、沙滩及河岸滨水带等。河岸整治形式采用生态护岸, 如植被护岸、木料护岸、生态混凝土净化槽护岸等。在不影响护堤抗洪的基本功能的同时, 尽可能促进河流的水文、生物动态过程, 确保能够有效调节地下与地表水的水文状况、植被的涵蓄水分作用、为水生生物提供栖息繁衍场所等。同时注重河岸植被缓冲带的建设, 确保缓冲带一定宽度, 并合理配置缓冲带植被, 充分发挥河岸缓冲带在水质净化、水土保持、生境营造方面重要作用。

4 结论与展望

总结了北京市各流域水生态健康状况, 进一步诊断出水生态健康问题产生的原因, 并以河流水生态健康为目标提出相关改善路径。主要结果如下: 北京市河流生态系统健康状况具有较强的空间异质性, 较健康河流主要分布在水系上游, 而中下游地区的健康等级则较低。总体上各流域河流水生态健康状况, 潮白河 > 永定河 > 蓟运河 > 清水河 > 北运河。每个流域水系中, 不同河流、同一河流不同河段也表现出了较强的空间异质性, 上游河段水生态健康状况好于中下游, 山区段河流好于平原段; 从时间上, 上游潮河、白河流域水生态健康状况相对稳定, 潮白河中下游段呈现退化趋势, 北运河流域河流呈现出先变差后变好的趋势, 永定河、大清河和蓟运河也均呈现出不同程度恶化趋势。分析河流水生态健康病因主要包括水资源不足、水污染物超量排放、水利工程建设以及河流水土资源的不合理开发等因素。

尽管针对北京市河流水生态健康评价方面已取得一些研究成果, 并已逐步实施水生态修复措施, 但由于研究历时较短, 评价方法不统一以及受技术手段和试验方法方面仍存在一些不足, 在该领域中仍然存在一些问题需要加强研究:

(1) 针对河湖水生态状况不清现状, 应加密水生生态系统的长期观测, 开展连续性、长系列的水生态监测和评估工作, 科学对比各河流水生态健康状况演变过程。对尚未对河流开展全面的生态状况调查, 解决河流水文情势、水生生物以及河流生境等基础数据严重缺失问题, 建立全市河流水生态系统的结构特征和生境特征数据库, 为后

期河流水生态修复奠定基础。

(2) 开展河流适宜生态流量研究。以水生态健康为目标, 从水生态完整性角度出发, 研究和探索北方河流, 包括平原区和山区河流适宜生态流量, 研究生态基流确定方法, 为河流生态流量保障提供依据。

(3) 开展北京市河流水生态系统功能区划分工作。北京市河流水系类型多样, 补水条件和自然禀赋各异, 在水生态调查的基础上, 应对河流进行分级分类, 针对不同类型河流分别采取不同的评价标准, 指导采取不同措施开展河流水生态修复工作。

(4) 建立完善的监测与评估体系, 强化断面水生态监测和考核。在完善科学的河流水生态监测与评估体系建设的基础上, 进一步研究制定河流水生态考核机制, 建立严格的管护责任制, 提高各行政区水生态修复力度。

(5) 加快开展水生态修复和恢复的研究及试点工作。针对大多数河流水生态健康受损问题, 一是开展河流水生态系统结构修复和功能恢复工作, 对河流微生境营造、生境多样性构建、水生生物功能群构建等水生态修复关键技术进行研究及示范。二是加快水生态修复模式推广及试点工作。针对不同类型的河流生态系统, 分别提出河流水生态系统修复和恢复模式以及各类型河流水生态修复指导和评估意见, 进行典型河流的水生态修复及恢复试点工作, 促进河流水生态系统恢复。

参考文献:

- [1] 孙然好, 魏琳沅, 张海萍, 等. 河流生态系统健康研究现状与展望—基于文献计量研究[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3526–3536.
- [2] 杨光明, 孙长林. 中国水安全问题及其策略研究[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 101–105.
- [3] WOO H. Assessment of Definitions and Models of River Restoration based on the Functions, Services, and Values of River Ecosystem[J]. Ecology & Resilient Infrastructure, 2017, 4(3): 123–129.
- [4] TAN X, MA P, BUNN S E, et al. Development of a benthic diatom index of biotic integrity (BD-IBI) for ecosystem health assessment of human dominant subtropical rivers, China[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151(15): 286–294.
- [5] 肖瑶, 黄岁樑, 孔凡青, 等. 基于水功能区控制单元的流域突发性水污染事件风险评价区划及其应用[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 222–228.
- [6] 田颖, 梁云平, 郭婧, 等. “水十条”对北京市地表水环境质量改善分析[J]. 环境工程, 2019, 37(4): 4–9.
- [7] 王乙震, 郭书英, 崔文彦. 海河流域河湖健康评估的实践与发展[J]. 海河水利, 2017(4): 7–11.
- [8] 杜桂森, 王建厅, 武殿伟, 等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 201–204.
- [9] 张可刚, 赵翔, 邵学强. 河流生态系统健康评价研究[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 11–14.
- [10] 高宇婷. 北京郊区典型河流表征指标分析及其生态健康评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [11] 王志刚. 北京北部山区河流健康评价及其诊断研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [12] 徐菲, 王永刚, 张楠, 等. 北京市白河和潮河流域生态健康评价[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 932–942.
- [13] 孙峰, 黄振芳, 杨忠山, 等. 北京市水生态监测评价方法构建及应用[J]. 中国环境监测, 2017, 33(2): 82–87.
- [14] 王燕华, 吴晓辉, 赵立新, 等. 潮白河(顺义段)底栖动物群落结构分析[J]. 北京水务, 2009(5): 45–47.

- [15] 陈毅, 张可刚, 郭纯青, 等. 河流生态健康评价研究—以潮白河为例[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(2): 15–18.
- [16] 解莹, 唐婷芳, 林超, 等. 海河流域河流生态健康评价及其软件应用[C]//水生态监测与分析论文集, 2008.
- [17] 尤洋, 许志兰, 王培京, 等. 温榆河生态河流健康评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 19–24.
- [18] 李文君, 邱林, 陈晓楠, 等. 基于集对分析与可变模糊集的流生态健康评价模型[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 775–782.
- [19] 宋刚福, 沈冰. “拉开档次”法的改进及其在河流生态健康评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2012(7): 163–168.
- [20] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 74–85.
- [21] 杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等. 基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3313–3322.
- [22] 萨茹拉, 刘来胜, 李志萍, 等. 北京奶水河湿地植物多样性调查与评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 18–25.
- [23] 孔凡青, 崔文彦, 周绪申. 基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的永定河水系生态健康评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 550–555.
- [24] 曹宸, 李叙勇. 区县尺度下的河流生态系统健康评价—以北京房山区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4296–4306.
- [25] 李博, 时慧. 北京拒马河流域水生植物资源调查及保护建议[J]. 中国水产, 2017(12): 60–61.
- [26] ZENG R, ZHAO Y W, YANG Z F. Emergency-based health assessment of Baiyangdian watershed ecosystem in temporal and spatial scales[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010 (2): 359–371.
- [27] 刘培斌, 高晓薇, 王利军, 等. 北京山区河流生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 98–101.
- [28] 王晨, 姚延娟, 高彦华, 等. 北京市河流干涸断流遥感监测分析[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(6): 170–173.
- [29] 陈晓江, 杨劫, 杜桂森, 等. 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 122–127.
- [30] 陈晓江, 杨劫, 杜桂森, 等. 海子水库浮游植物群落结构特征与水质关系研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(22): 5579–5583.
- [31] 刘宇同, 杨伟超, 杨丽娜, 等. 北运河流域水生态恢复与保护的实践探索[J]. 北京水务, 2019(3): 57–62.
- [32] 胡涛. 北京密云水库及上游潮、白河大型底栖动物群落结构和水质生物评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [33] 吴玉梅, 王浩. 水生生物调查指标体系构建及应用研究[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(4): 8–11.
- [34] 王刚, 潘涛, 严登华, 等. 水利工程群应对干旱能力定量评价研究: 方法及案例[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 56–63.
- [35] 黄彬彬, 严登华, 王浩. 干旱对河流生态系统影响研究与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 12–18.
- [36] 马东春, 唐摇影, 王凤春, 等. 河长制下北京水生态环境保护管理路径研究[J]. 中国水利, 2019(20): 11–16.
- [37] 邱琰茗, 黄炳彬, 叶芝茜, 等. 北运河生态健康快速评价研究[J]. 北京水务, 2020(4): 52–58.
- [38] 左其亭, 陈豪, 张永勇. 淮河中上游水生态健康影响因子及其健康评价[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1019–1027.
- [39] 刘宇同, 杨伟超, 杨丽娜, 等. 北运河流域水生态恢复与保护的实践探索[J]. 北京水务, 2019(3): 57–62.
- [40] 李瑶瑶, 于鲁冀, 吕晓燕, 等. 淮河流域(河南段)河流生态系统健康评价及分类修复模式[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(7): 185–192.

Study on Temporal and Spatial Heterogeneity of Aquatic Health and Improvement Paths of Rivers in Beijing

WANG Xu^{1,2}, WANG Yonggang¹, WU Dayong² and BI Wuxia

(1. Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, National Engineering Research Center for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 2. Hebei Key Laboratory of Wetland Ecology and Conservation, Hengshui 053000, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: River ecosystem is the basic condition for the survival and development of human society. The river aquatic health is of great significance for ensuring regional water safety and avoiding water disasters. With the continuous advancement of urbanization, river ecosystems are facing huge challenges, and aquatic ecological risks and disasters are showing a trend of widespread, frequent and deep-occurring. Based on a review of the research on the assessment of the ecological health of the five major water systems in Beijing, the major problems of regional aquatic ecosystems are identified, and the causes of aquatic health problems are further diagnosed. The results show that the health status of river ecosystems has strong spatial heterogeneity in Beijing. In general, comparison of aquatic ecological health status of rivers in different river basins is Chaobai River > Yongding River Basin > Ji Canal Basin > Qingshui River Basin > Bei Canal Basin. The health status of water ecology in the upper reaches is better than that in the middle and lower reaches, and the rivers in the mountain sections are better than the plain sections. Insufficient river ecological basic flow caused by water shortage, water quality failure caused by excessive discharge of water pollutants, extensive river water conservancy project construction, unreasonable development of river water and soil resources, and insufficient river vegetation buffer zone are the main causes of health problems. To the problem, a health improvement path led by river water ecological health is proposed. With a view to transforming the management of Beijing's aquatic environment from water pollution prevention to aquatic protection, it will provide a reference for improving the aquatic ecological health of rivers in Beijing and other cities.

Key words: river; aquatic ecological health; heterogeneity; improvement path; Beijing