

河湖生态系统保护与修复
工程技术导则

Technical guidelines for river-lake ecosystem conservation and
restoration engineering

（报批稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中华人民共和国水利部 发布

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，编制本标准。

本标准共分 11 章和 4 个附录，主要技术内容有：

——河湖生态系统调查与评价；

——设计原则；

——河湖生态流量保障、水质保护与改善、河湖地貌形态保护与修复、重要水生生物栖息地与生物多样性保护、水文化遗产与水景观构建；

——材料和施工、监测和管理。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水资源管理司

本标准解释单位：水利部水资源管理司

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准参编单位：水利部水利水电规划设计总院

水电水利规划设计总院

水利部中国科学院水工程生态研究所

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

安徽省水利水电勘测设计院

水利部水资源管理中心

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：彭文启 赵进勇 朱党生 常剑波 张 晶 朱 青

薛联芳 张建永 张鸿星 袁建平 李德旺 黄利群

董浩平 吴 师 史 方 黄一凡 刘心爱 王 琦

陆 波 黄 滨 付意成 张文平 翟正丽 张爱静

本标准审查会议技术负责人：董哲仁

本标准体例格式审查人：陈昊

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条 2 号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

目 次

1	总 则.....	1
2	术 语.....	3
3	河湖生态系统调查与评价.....	4
3.1	一般规定	4
3.2	水文水资源	4
3.3	水质状况	4
3.4	河湖地貌	5
3.5	生物状况	5
3.6	社会经济及历史文化.....	6
3.7	河湖生态现状综合评价.....	6
4	设计原则	7
4.1	一般规定	7
4.2	总体要求	7
5	河湖生态流量保障.....	8
5.1	一般规定	8
5.2	生态水量优化配置.....	8
5.3	生态流量泄放	8
5.4	生态流量调度	8
6	水质保护与改善.....	10
6.1	一般规定	10
6.2	入河湖排污口整治.....	10
6.3	面源与内源治理	10
6.4	河湖水体水质维护.....	10
7	河湖地貌形态保护与修复.....	12
7.1	一般规定	12
7.2	河湖水系生态连通.....	12
7.3	平面形态	12
7.4	河滨带和湖滨带	12
7.5	河道断面多样性	13
7.6	生态型护岸	13
7.7	河道内地貌单元生态重建.....	13
8	重要水生生物栖息地与生物多样性保护	15
8.1	一般规定	15
8.2	产卵场、索饵场、越冬场保护与修复.....	15
8.3	洄游通道保护与恢复.....	15
8.4	增殖放流	16
8.5	替代生境	16
8.6	水温影响减缓	16
8.7	下泄饱和和气体影响减缓.....	16
8.8	其他保护措施	17
9	水文化传承与水景观构建.....	18

9.1	一般规定	18
9.2	水文化传承	18
9.3	水景观构建	18
10	材料和施工	19
10.1	材料选择	19
10.2	工程施工	19
11	监测和管理	20
11.1	河湖生态监测	20
11.2	后评估	20
11.3	河湖生态综合管理	21
附录 A	现状调查表样	22
附录 B	生物完整性评价	26
附录 C	生态型护岸技术	28
附录 D	人工鱼巢技术	34
标准用词说明		36
条文说明		37

1 总 则

1.0.1 为规范河湖生态系统保护与修复工程技术要求，维持和改善河湖生态系统功能，发挥其综合效益，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于大中型河流、重要湖泊（水库）等水域的生态系统保护与修复工程设计，小型河流以及其它湖泊（水库）水域的生态系统保护与修复工程设计可参照执行。本标准也适用于新建水利水电工程的生态系统保护与修复设计，以及已建水利水电工程的生态化改造、生态调度与管理。

1.0.3 河湖生态系统保护与修复工程建设应符合下列要求：

1 在开展河湖生态系统保护与修复工程前，应以国家及相关部门规划或上位规划为依据，编制河湖生态系统保护与修复规划。

2 应根据河湖生态系统实际情况，协调防洪安全、排涝安全、供水安全等方面需求和河湖生态系统保护与修复的关系，合理确定工程建设目标。

3 应根据不同的水文地域条件差异，因地制宜选择合适的工程技术措施，鼓励采用成熟可靠的新技术、新材料、新工艺。

4 应符合建设工程环境影响评价相关要求。

1.0.4 本标准主要引用下列标准：

GB 3838 地表水环境质量标准

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 18921 城市污水再生利用 景观环境用水水质

GB/T 25173 水域纳污能力计算规程

GB/T 37071 农村生活污水处理导则

GB 50286 堤防工程设计规范

GB/T 50290 土工合成材料应用技术规范

GB50400 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范

GB50513 城市水系规划规范

GB 50707 河道整治设计规范

GB50773 蓄滞洪区设计规范

SL 58 水文测量规范

SL 196 水文调查规范

SL 219 水环境监测规范

SL 223 水利水电建设工程验收规程

SL 257 水道观测规范

SL 303 水利水电工程施工组织设计规范

SL 379 水工挡土墙设计规范

SL 383 河道演变勘测调查规范

SL 395 地表水资源质量评价技术规程

SL 471 水利风景区规划编制导则

SL 489 水利建设项目后评价报告编制规程

SL 492 水利水电工程环境保护设计规范

SL 605 水库降等与报废标准

SL 609 水利水电工程鱼道设计导则

SL 613 水资源保护规划编制规程

SL 623 水利水电工程施工导流设计规范
SL 662 入河排污量统计技术规程
SL 670 水利水电建设工程验收技术鉴定导则
SL 709 河湖生态保护与修复规划导则
SL 752 绿色小水电评价标准
CJJ/T 54 污水自然处理工程技术规程
HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范
HJ 494 水质 采样技术指导
HJ 495 水质 采样方案设计技术规范
NB/T 35037 水电工程鱼类增殖放流站设计规范
NB/T 35053 水电站分层取水进水口设计规范
SC/T 9102.3 渔业生态环境监测规范
SC/T 9401 水生生物增殖放流技术规程

1.0.5 河湖生态系统保护与修复工程除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 河流廊道 river corridor

河道及其两岸滩区、水域岸线区以及与之连通的湖泊等形成的空间区域。实际规划设计工作中，河流廊道宽度可采用对应某一洪水频率的河流滩区范围。

2.0.2 水文情势 hydrological regime

各种水文要素时空变化的态势和趋势，常用流量、频率、发生时机、延续时间、流量和水位变化率等表示。

2.0.3 河湖生态空间管控 management and control of aquatic ecotope

以河湖水域及岸线等为主要对象，以水资源水环境和水生态承载能力为依据，在河湖生态空间、水资源利用、水环境质量及能力建设等方面所采取的管理政策、制度、措施和行动等，以规范、引导、监控、约束河湖生态空间保护、开发利用及涉水各类经济社会活动，保障水生态服务和生态产品的持续供给。

2.0.4 胁迫因子 stress factor

自然界或人类活动对河湖生态系统演变带来胁迫影响的因子。

2.0.5 空间异质性 spatial heterogeneity

某种生态学变量在空间分布上的不均匀性及其复杂程度，河湖地貌形态空间异质性决定了生物栖息地的多样性、有效性和总量。

2.0.6 生态型护岸 ecological revetment

在传统护岸技术基础上，利用活体植物和天然材料作为护岸材料，既满足岸坡防护要求，又能为生物提供良好栖息地条件、改善自然景观的护岸结构。

2.0.7 水系生态连通 ecological connectivity of water system

保护、修复河流在纵向、横向和垂向空间以及时间维度上的物理连通性和水文连通性，改善水动力条件，促进河湖水系中物质流、物种流和信息流保持畅通，即河湖水系三流四维连通。主要针对以水生态环境修复为主，同时兼顾防洪减灾和水资源配置需求的河湖水系连通类型。

2.0.8 河流地貌单元 fluvial geomorphological units

河流廊道内由于河床演变、水沙冲淤等过程所形成的多样化的地貌结构特征，如河流故道、河漫滩、深潭、浅滩、洲滩、牛轭湖故道以及自然堤等。

2.0.9 替代生境 equivalent habitats

由于人类活动而导致某特定种类动植物赖以生存的原生境受到破坏时，在其他位置所营造的、能够维持其生存或生活的自然或近自然环境。

3 河湖生态系统调查与评价

3.1 一般规定

3.1.1 开展河湖生态系统保护与修复工作应通过资料收集、现场调查等方式分析工程建设区及周边影响区的社会经济、水文水资源、水环境、水生态、水利工程以及监测能力等方面的基础情况。

3.1.2 资料收集范围宜结合行政区划、水资源分区、主体功能区划、生态功能区划、水功能区划、生态红线范围、水系连通调度区域等合理确定，时间上宜反映出河湖水系历史演变情况。对资料缺乏地区可采用卫星遥感、无人机、地理信息系统、全球定位系统等先进技术方法进行必要的现场调查和监测。

3.1.3 应在调查分析基础上进行河湖生态系统现状评价，并可通过历史资料对比分析或流域调查等方法确定参照系统，进行综合评价。

3.2 水文水资源

3.2.1 水文水资源调查应主要包括水文信息采集分析、泥沙测验和计算、水资源状况调查等。

3.2.2 水文信息采集内容应包括水位、流量、水质、泥沙、降水、蒸发、水温、冰凌和地下水等要素，并应符合 SL 196 有关规定和下列要求：

1 应根据系列水文资料，利用统计学方法推求水文情势变化规律，进行水文频率计算，以满足设计需要。

2 测站定位观测应作为收集水文资料的主要途径。

3 水文调查应作为定位观测的补充，内容包括流域调查、洪水及暴雨调查、漫滩流量调查以及生态流量状况调查等。

3.2.3 泥沙测验和计算中应采用含沙量和输沙率来定量描述悬移质状况，必要时宜进行泥沙颗粒分析和级配曲线绘制。

3.2.4 水资源调查内容应包括地表水资源、地下水资源、水资源总量及水资源开发利用状况，其中水资源开发利用状况包括生活、生产、生态用水状况及水资源（含水能资源）开发利用程度等。

3.3 水质状况

3.3.1 水质状况调查内容应主要包括水体质量调查、沉积物污染状况调查和污染源调查等，无资料地区应开展必要的补充监测，相关调查表格可参照附录 A。

3.3.2 水体质量状况调查项目应符合 GB 3838 和 SL 395 要求。河流水样采集断面布设、项目选择及采样方法应符合 SL 219、HJ/T 91、HJ 494 和 HJ 495 等要求。应调查确定工程建设范围内的河湖水功能区划及水质管理目标。湖库水域还应进行富营养化状况调查。

3.3.3 沉积物污染状况调查内容应包括河漫滩沉积物、河床沉积物、湖泊沉积物等，并应符合 GB 15618 和 SL 219 的有关规定。

3.3.4 污染源调查内容应包括点源、面源、内源、移动源、入河湖排污口情况及各类型

污染源主要污染物特征等，并进行污染负荷分析计算，入河湖排污口情况调查应符合 SL662 相关规定。

3.3.5 应在水质调查的基础上进行水质评价，评价方法应执行 GB 3838 和 SL 395 的有关规定。

3.4 河湖地貌

3.4.1 河湖地貌调查主要包括河湖水系概况、河湖地貌特征、地貌单元、河床底质、岸线及其利用情况、涉水工程建设情况等，相关调查表格可参照附录 A。

3.4.2 河湖水系概况应包括流域基本情况、水系形态、河网密度、河湖水系连通状况、河道演变情况、河湖水系历史变迁情况、小流域坡面侵蚀情况等，应符合 GB 50707、SL 383 的相关规定。

3.4.3 河流地貌特征调查内容应包括河流分级分类、平面形态、横断面和纵剖面特征、水下地形等，并在调查基础上进行地貌过程分析。湖泊地貌特征调查内容应包括水域面积、容积、水深、水位变幅、吹程、水力停留时间、岸线形态、湖泊内地貌单元、湖泊底部地形等。相关调查应符合 SL 257 的规定。

3.4.4 河湖地貌单元调查内容应包括河流廊道范围内的河流故道、河漫滩、深潭、浅滩、洲滩、牛轭湖故道、自然堤、局部封闭小水域、沼泽洼地、河湖连通道等地貌单元的形状、位置、尺寸与变化情况等。

3.4.5 河床底质调查应在地质勘查资料基础上，对河床淤积层厚度及构成、底质组成及级配、渗透性等展开调查及分析。

3.4.6 岸线及岸线利用情况调查内容应包括岸线现状长度、横向范围、功能类别划分、岸线利用率、岸线利用是否合法合规等。

3.4.7 涉水工程建设情况调查内容应包括水利水电、航道整治、管道、交通、取排水等不同类型工程的名称、位置、数量、规模、等级、功能、建设时间及运行管理情况等，小型水电站的调查评价可参照 SL 752 相关规定。

3.5 生物状况

3.5.1 河湖生物状况调查应包括水生生物分布、河岸带或湖滨带生物分布、重要水生生物生存现状、外来物种情况、重要水生生物生境状况等，相关调查表格可参照附录 A。

3.5.2 水生生物分布调查应包括区域内浮游植物和大型底栖无脊椎动物种类组成、数量和生物量、着生藻类种类组成和数量、大型水生维管束植物种类组成和生物量、鱼类种类组成和渔产量、其它水生动物种类组成等。对于鱼类应重点调查其产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道的分布、面积等。调查方法应符合 SC/T 9102.3 的规定。

3.5.3 河岸带或湖滨带生物分布调查内容应包括植被种类组成和盖度、两栖动物、爬行动物、鸟类（水禽）的种类组成、数量、活动范围和生态习性等。

3.5.4 重要水生生物生存现状调查内容应包括区域内土著、珍稀、濒危及特有物种的种类、分布、资源量、人工繁殖情况、种质资源保存情况及其完成生活史所需的水流、水温、底质等生境因子情况等。

3.5.5 外来物种情况调查内容应包括区域内主要外来物种的种类、分布、资源量、入侵时间、入侵危害、防治措施及效果等。

3.5.6 重要水生生物生境状况调查内容应包括区域内饮用水水源保护区、自然保护区、风景名胜、种质资源保护区、世界自然遗产地等涉水保护区的分布及现状情况等。

3.5.7 可根据区域生物状况，开展鱼类、底栖动物或浮游生物的生物完整性评价，对河

湖生态系统生物完整性状况进行评估，根据评估结果确定重要水生生物栖息地与生物多样性保护的具体区域与对象，可参照附录 B。

3.6 社会经济及历史文化

3.6.1 社会经济及历史文化调查内容应主要包括河湖水系范围内的行政区分布、人口、产业结构、特色产业、重点企业等社会经济发展情况，以及涉水历史文化、民俗民风、人文古迹、河湖水系景观、水文化载体等。

3.6.2 可利用相关规划与计划、政府公布数据、统计年鉴、地方志及有关数据库等资料辅助开展相关调查。

3.7 河湖生态现状综合评价

3.7.1 河湖生态现状综合评价应对河湖水文情势、水质状况、河湖地貌、生物状况等生态要素进行综合评价，河湖生态现状评价应符合 SL 709 的有关规定。

3.7.2 宜针对流域、河流廊道、河段等不同尺度，对比现状与历史状况，建立参照系统、评价标准和河湖生态状况分级系统，对河湖生态系统各项指标进行单项和综合评价。

3.7.3 应根据现状调查和评价结果，筛选和识别河湖生态系统结构和功能演变的主要胁迫因子，判定区域的生态系统退化程度和退化原因，分析河湖生态存在的主要问题，明确河湖生态保护与修复的方向。

4 设计原则

4.1 一般规定

4.1.1 应遵循自然规律，充分发挥生态系统自我修复功能，根据不同区域河湖特点、功能定位和保护要求，通过适度人工措施，保障河湖生态流量、维持河湖水系自然形态，改善水环境质量、保护重要水生生物栖息地，促进生态空间格局优化、系统稳定和功能提升，充分发挥拟自然治理技术作用。

4.1.2 应坚持生态优先，加强河湖生态空间管控，依法划定河湖管理范围，明确水域、岸线等空间范围和用途管制类型，划定并严守水资源利用上线、水环境质量底线、生态保护红线，提出水资源、水环境及水生态等各要素管控目标和措施要求，将各类开发活动限制在水资源水环境和水生态承载力之内。

4.1.3 应统筹山水林田湖草系统治理，协调防洪、供水、水电开发、矿产开发、交通建设等与生态保护的关系，合理布局各类生态保护和修复措施，并开展多种方案优化比选，优先选择技术先进适用、生态改善效果良好、工程管理经济方便、建设成本相对较低的方案。

4.1.4 结合自然、经济社会特点，统筹协调河湖开发与保护的关系，提出河湖生态保护与修复工程和非工程措施，各类工程设施应结构合理、安全稳定，既要满足行洪、滞洪等要求，又能提升河湖生态系统质量和稳定性。

4.1.5 应定期开展水生态监测和河湖健康评估，加强水生态修复措施的运行管护等，开展生态保护和修复的适应性管理，不断优化和改进生态保护和修复措施和方案。

4.2 总体要求

4.2.1 应依据相关规划和区划，从维护河湖生态完整性角度，合理确定河湖生态保护与修复的总体目标，明确水文情势、水质状况、河湖地貌、生物状况等方面的具体指标和目标，可建立河湖生态状况分级系统并提出定量目标。

4.2.2 应结合河湖水文水资源特点、开发利用与治理状况、生态系统状况及存在问题等，针对流域、河流廊道、治理河段不同尺度，合理确定保护和修复的功能类型分区，明确河湖生态功能定位和保护与修复要求。

4.2.3 应以保护目标和存在问题为导向，综合协调干支流、上下游、左右岸及湖泊水库等不同区域关系，重视人类活动影响，优化河湖开发和保护空间格局，分类型、分河段明确保护与修复重点与方向，从空间分布、重点工程、实施时序等方面进行生态保护与修复工程的总体布局。

4.2.4 应根据生态保护与修复目标和总体布局，结合工程实施条件，因地制宜提出河湖生态流量保障、水质保护与改善、河湖地貌形态保护与修复、重要水生生物栖息地与生物多样性保护、水文化传承及水景观构建、监测与管理等任务和措施要求。

4.2.5 应完善水资源消耗总量和强度双控、入河湖排污管控、河湖生态空间管控、水生态保护补偿、监督考核和责任追究、承载能力监测预警等制度和机制，形成促进河湖休养生息、维护河湖健康的管理体系。

5 河湖生态流量保障

5.1 一般规定

5.1.1 应根据不同地域、不同类型河湖的气候水文特性、水资源禀赋条件及开发利用状况、河湖生态功能定位等，分析明确主要生态保护对象及保护要求，合理确定控制断面和指标体系，开展重要河流生态流量过程和湖泊生态水位过程满足状况评价，分析存在的主要问题和成因。

5.1.2 宜结合不同类型计算方法的适用条件和数据获取情况，选取合适的计算方法，对不同水平年河流生态流量和湖泊最低生态水位进行核算，并应符合 SL 613 和 SL 709 有关规定。

5.1.3 应结合生态流量过程或生态水位过程保障目标和存在问题，分区施策、分类指导，以目标不满足的河湖及控制断面为重点，针对性提出生态水量优化配置、生态流量泄放及监控设施、生态流量和生态水位调度与管理等措施。

5.2 生态水量优化配置

5.2.1 应结合流域综合规划、水量分配方案，以河湖流域为单元，以生态流量或生态水位保障目标为依据，将河湖生态用水纳入流域区域水资源统一配置，统筹生活、生产、生态用水，合理确定不同水平年河湖生态水量配置方案。

5.2.2 针对生态流量不满足的河湖和控制断面，应结合本地水资源禀赋条件及开发利用状况，提出强化用水消耗总量和强度双控、加强取水监管、实施河湖水系连通、加大再生水及雨水资源利用等对策措施。

5.2.3 针对水资源短缺、严重挤占生态用水的地区，应合理确定分阶段生态修复治理目标，通过制定并严格实施用水总量削减方案，实施更严格的节水标准，优化调整产业结构，退减不合理灌溉面积，实施农业节水回购，推进水权制度改革等措施，逐步退减被挤占的生态用水，必要时可提出引调水、生态补水等措施等。

5.3 生态流量泄放

5.3.1 水利水电工程生态流量泄放方式应包括闸门泄流、坝体埋管、引水洞泄流、生态机组等，可根据不同的工程类型和生态流量过程要求合理选择，进水口应低于水库（或调节池）死水位。

5.3.2 对于新建水库、水电及拦河闸坝等，应充分考虑河湖生态保护要求，尽可能减少对水文情势、河流形态和生物生境的影响，并结合工程总体布置，明确蓄水初期和运行期的生态流量泄放设施建设要求，与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。

5.3.3 对生态流量泄放不足或不具备泄放设施的已建水利水电工程，应考虑工程建设及运行条件，分不同类型提出生态流量泄放设施建设、闸坝生态化改造及水库降等或报废等措施，采取水库降等或报废措施时应符合 SL 605 有关规定。

5.4 生态流量调度

5.4.1 应结合河湖主要控制断面的生态流量或水位过程目标，分析与生态流量过程保障直接相关的已建、在建水利水电工程，统筹协调供水、防洪、发电、航运等与生态流量

过程保障之间的关系，明确生态流量调度的目标、原则要求和优先顺序等。

5.4.2 对具有综合利用功能的水利枢纽工程，应分析其综合利用要求和调度运行的约束条件，以保障防洪安全和城乡生活供水安全为前提，按照优先满足生态流量的要求，明确调度运行规则，采取兼顾生态保护的水库调度方式，并分析调度规则调整对其他用水目标的影响，必要时在兴利库容中预留一定的生态用水库容。

5.4.3 对具有较强调节能力的水库、水电站，可充分挖掘丰水期、平水期的径流调节能力，利用汛期中小洪水，合理安排下泄水量和泄流时段，通过制造人工洪水或流量脉冲，尽可能形成近自然的水文情势，能够满足河漫滩、鱼类繁殖等敏感生态流量及过程需求。

5.4.4 对流域上下游建有多个控制性水库及拦河闸坝的河流，在满足单个工程生态流量保障要求的前提下，应按照流域生态系统保护的要求，根据上下游河流廊道、湖泊、河口及鱼类栖息地等生态流量及过程要求，分析各工程的调度约束条件和调度目标，综合提出流域上下游梯级联合调度的原则和措施。

5.4.5 对拦河闸坝及取水工程，应结合生态流量保障目标，明确取水规模及过程管控要求；当上游来水流量低于生态流量目标时，可按“来多少放多少”的原则泄放，严格实施取水限制措施。

5.4.6 对平原水网区的闸站群联合调度，应综合考虑区域防洪除涝、城乡供水、水环境和水生态改善等需求，在满足防洪排涝安全的前提下，结合汛期、非汛期不同水情和生态流量或水位目标，合理制定区域水网闸站群联合调度方案。

5.4.7 对跨流域引调水工程或生态补水工程，应根据水源区水资源条件和生态状况、受水区生态保护要求，明确工程调度的约束条件，合理制定跨流域引调水或生态补水调度方案，必要时提出生态应急补水措施。

6 水质保护与改善

6.1 一般规定

6.1.1 应按照不同水域水功能区水质目标，针对区域水质现状和存在问题，结合水资源配置和不同水源水质特征分析，根据水域纳污能力分析结果，结合排污许可管理，基于入河湖排污口现状调查和区域经济社会发展需求，综合制定污染物入河湖量控制方案，保障水质目标实现，并应符合 GB/T 25173、SL 613 的相关规定。

6.1.2 水质保护与改善措施应包括入河排污口整治、面源与内源治理、河湖水体水质维护等。

6.2 入河湖排污口整治

6.2.1 应在陆域污染源控制的基础上，根据污染物入河湖量控制方案，提出入河湖排污口的布局调整和分类治理方案。

6.2.2 对排污量已超出水功能区限制排污总量的河湖，应采取提高排放标准、减少排放量、排污口并入管网、排污口归并、调整排放等措施，实施综合治理。

6.2.3 对排污口已达标排放，但水体水质仍不能满足水功能区水质目标的河湖，应采取污水处理厂提标排放、入河（湖）前自然生态净化等污水深度处理措施。

6.3 面源与内源治理

6.3.1 面源污染治理应包括源头减量、过程削减等，内源污染治理包括底泥清淤处置、原位处理等。

6.3.2 源头减量应满足下列规定。

1 应通过调整农业生产方式提高农药化肥使用效率、农村生活污水分散式处理、畜禽养殖专项治理等措施进行农业农村面源源头减量，农村生活污水处理应符合 GB/T 37071 相关规定。

2 应根据屋面、庭院、道路、滨水区等不同下垫面特点以及排水管网和排水泵站的特点，提出城市降雨初期径流污染的截留和处理措施。

6.3.3 过程削减应根据面源污染物向附近河湖水体的输移规律，利用生态沟渠、土壤渗滤、前置库、滨水缓冲带、小微水体修复、雨水净化等技术进行污染物削减，雨水净化技术要求可参照 GB 50400 的相关规定。

6.3.4 底泥清淤处置应满足下列规定。

1 应在河湖底泥调查基础上明确污染底泥清淤范围和深度，进行无害化处理后采用合理的方式进行生态清淤和淤泥处置。

2 可在合理分析基础上采用覆盖、固化、微生物等技术进行底泥原位处理。

6.3.5 饮用水水源地、输水干线等水域应采用植物隔离带、隔离网、护栏网等综合隔离措施等。具有航运功能的河流、湖泊，应进行移动源污染控制。

6.4 河湖水体水质维护

6.4.1 河湖水体水质维护技术应主要包括人工曝气增氧、生物浮床、河道生物接触氧化、水系连通活水循环、自然生物处理、除藻技术、生态沉床、湖泊生态系统构建等水环境

治理修复技术，自然生物处理相关内容可参照 CJJ/T 54 的相关规定。

6.4.2 城市河湖、公园、绿地、风景区内水体以及住宅区中人造瀑布、喷泉等设施内城市水系景观水体水质应符合 GB 3838 和 GB/T 18921 中景观水体水质相关规定。

6.4.3 城市水系景观水体水质维护工作应与水闸泵站等城市水利设施和给排水管网等城市基础设施的运行管理相结合。

7 河湖地貌形态保护与修复

7.1 一般规定

7.1.1 由于人类活动引起河流渠道化、河湖水系阻隔河道及湖泊萎缩并导致河湖生态系统退化时，应进行河湖地貌形态保护与修复。新建及改扩建的防洪及河道整治工程应充分考虑河湖地貌形态保护与修复要求。

7.1.2 应分析河床演变历史及趋势，优化河湖水系空间格局，确定河湖生态廊道空间尺度和范围，识别河流纵向和横向地貌空间异质性和河流地貌单元多样性特征，在保障河流社会经济功能的同时应保障生态功能，开展河流廊道自然化工程设计。城市地区河湖可因地制宜采取措施，实现一定程度的自然化。

7.1.3 河湖地貌形态保护与修复措施应包括河湖水系生态连通、河流平面形态蜿蜒性修复、河滨带和湖滨带保护、断面形状多样性修复、生态型护岸及地貌单元生态重建等。

7.2 河湖水系生态连通

7.2.1 河湖水系生态连通应包括修复河流纵向、侧向和垂向空间三维以及时间维度上的物理连通性和水文连通性，改善水动力条件，促进物质流、物种流和信息流的畅通流动。

7.2.2 应在流域尺度下制定水系生态连通方案，进行河湖水系连通性空间景观格局配置，优化河湖水系生态连通格局，制定工程措施与非工程措施。

7.2.3 河湖水系连通性空间景观格局配置应统筹考虑城镇、农田分布情况，对于支流、湖库、蓄滞洪区、沼泽、牛轭湖、故道等进行空间布局，蓄滞洪区空间布局应符合 GB50773 相关规定。

7.2.4 应对多个河湖水系生态连通格局方案在河势稳定性、防洪安全、水量存蓄、水环境容量、生物适宜性栖息地提供等方面进行定量分析，选择最优方案。

7.2.5 应对水系生态连通修复方案进行风险分析，使生态风险可控制、环境影响可接受。有饮用水源功能的河湖开展水系连通时应充分论证，确保饮用水源水质不受影响。

7.3 平面形态

7.3.1 河流平面形态修复应根据山丘区、平原区等不同地域河流类型特点，综合考虑河流的水文特性以及行洪、生态、通航等功能要求，宜弯则弯，合理确定河道治导线平面形态参数，修复河流平面形态的蜿蜒性。

7.3.2 在堤线布置时宜保留江河湖泊的自然形态，避免人工裁弯取直，保留或恢复其蜿蜒性。在确定堤防间距时，应遵循宜宽则宽原则，处理好行洪、生态保护及土地集约利用之间的关系。对于中小型河流整治工程应避免缩小堤防间距。

7.3.3 平面形态参数确定方法可采用复制法、经验关系法、参考河段法、系统分析法及自然恢复法等。

7.4 河滨带和湖滨带

7.4.1 应结合流域管理和相关规划，明确河滨带、湖滨带等河湖水域岸线生态空间管控范围、内容和要求，并应符合 GB50513 的相关规定。

7.4.2 根据河湖岸线功能定位，可区分城镇段和乡村段，明确河湖岸线分区方案与管控

目标，保护、培育、修复河滨带和湖滨带生态系统。

7.4.3 河滨带保护与修复应包括植物物种选择、植物配置、生境营造设计、陆域植物群落恢复、水生植物系统构建等，其结构宜为岸边草地与乔木、灌木相结合的形式。

7.4.4 应有步骤地实施退田还湖、退塘还湖、河口湖滨退化带修复等工程，考虑湖泊整体富营养化水平及其变化特征，根据湖滨生态演替规律，分区、分阶段恢复连续、健康的环湖湖滨带。

7.4.5 水库消落带保护与修复应以植物系统构建为主，结合水文、气象和水库调度运行等相关资料，对消落带多年常水位进行分析，找出陆域与水生植物种植的分界点，对陆域和水域耐淹植物进行合理配置。

7.5 河道断面多样性

7.5.1 河道断面多样性修复包括河流纵断面坡降确定、横断面多样性改善、深潭浅滩序列布局等，并应以改善河湖生态系统的结构、充分发挥栖息地功能和提高生物群落多样性为导向。

7.5.2 河道纵向坡降宜采用自然坡比，避免采用单一坡降，并与河道内栖息地加强结构相结合，技术条件复杂的应进行试验研究，重点工程应进行多种方案比选。当采用多级跌水调整纵向坡降时，平原地区单级跌水高度不宜超过 0.3m，山丘区单级跌水高度可因地制宜，根据地形地貌实际合理确定。

7.5.3 横断面多样性修复应综合考虑河段功能、行洪安全、平面形态、泥沙冲淤等因素，设置主河槽、河漫滩、河滨带等多种地貌形态，避免采用规则几何断面，缺水地区应避免形成大水面。

7.5.4 宜在河道或主河槽内合理布局深潭-浅滩序列，主要包括位置设定、控制断面宽度和深度确定、河床基质铺设等。

7.6 生态型护岸

7.6.1 应根据河道岸坡坡度、水流特点和岸坡土质等因素选择适宜的生态型护岸结构型式，按照所采用护岸材料，典型生态型护岸技术主要有天然植物类、石笼类、木材-块石类、多孔透水混凝土构件、组合式等不同型式，可参照附录 C。

7.6.2 应合理分析生态型护岸结构在重力、水流拖拽力、坡内渗流作用力和波浪吸力作用下的整体稳定性和局部稳定性，并分析计算坡脚淘刷深度及范围，保证工程安全，可参照 GB 50286 有关规定；宜充分发挥植被根系在生态型护岸结构中的加筋与锚固作用，必要时应进行植被根系生长和岸坡土体强度加强效果试验。

7.6.3 应采用合理方法确定采用生态型护岸措施的含植物河道水力糙率，并利用水动力分析方法评价河道过流能力。

7.6.4 可采用砂砾碎石层或无纺土工织物作为岸坡防护结构与坡面之间的反滤层，必要时通过透水和冲刷试验合理确定砂砾碎石层的级配，用作反滤的无纺土工织物单位面积质量宜大于 300 g/m²。

7.6.5 对于现有的硬质化护岸工程，可结合生态保护和景观建设要求，采用覆土工法、原位植生等技术进行生态化改造，并适当采取加固措施。

7.7 河道内地貌单元生态重建

7.7.1 受人为活动影响大、河流地貌单元空间异质性差、水力条件单一、栖息地退化或

存在目标物种保护需求时，可采用生态堰、卵石群、固床技术等进行河道内地貌单元生态重建。

7.7.2 生态堰的布置方式和结构组成应结合当地材料、水动力情况、稳定分析、目标功能等情况综合确定，外部形态应采取不影响鱼类通过的仿生式堰体，堰体材料组成应满足安全过流、有效净水和自然修复等要求。

7.7.3 卵石群设计时应应对可能出现的淘刷、淤积、洪水和河岸侵蚀等地貌过程进行分析，卵石群数量、每群的石块数及间距等需根据河流规模合理确定。卵石群应布设在靠近主河槽处，在平滩断面上所阻断的过流区域不宜超过 1/3。

7.7.4 固床技术应包括阶梯式和石梁式固床技术，主要作用是降低河水流速、创建多样化流场、防止河床淘刷和稳定河床等。在北方地区局部河段，可结合利用河床分区生态控渗技术，对河床基质进行合理改善或重构。

8 重要水生生物栖息地与生物多样性保护

8.1 一般规定

8.1.1 重要水生生物栖息地与生物多样性保护的对象应为濒危、珍稀、特有水生生物及维持其生存繁衍所需的水文、水质、底质、植被等生境条件，主要措施应包括产卵场、索饵场、越冬场保护与修复、洄游通道保护与恢复、增殖放流、替代生境、水温影响减缓、下泄饱和气体影响减缓等。

8.1.2 生物多样性保护的重点区域应包括河岸带、湖滨带等，可通过河湖管理范围及生态保护红线划定、生态空间管控、生态补水、生境恢复等技术措施和河滩保护、执法管理等综合措施，实现保护生物多样性的目标。

8.1.3 高等水生植物生物多样性保护宜重点保障其生长所需的底质和水文条件，保护措施包括底质保护与恢复、生态补水、人工恢复植被等。

8.1.4 鱼类生物多样性保护应重点保障区域濒危、珍稀、特有种完成生活史。繁殖期应通过加强水资源统一调度、优化水库运行方式等措施保护繁殖所需水文条件。早期资源发生期应通过保护岸边带植被、保持浅滩宽度等措施保护早期资源生长所需环境条件。

8.1.5 两栖动物、爬行动物、鸟类（水禽）等其它生物保护应禁止非法捕捞、改善栖息环境、设立自然保护区等。

8.2 产卵场、索饵场、越冬场保护与修复

8.2.1 应从流域整体出发，对天然生境进行调查、划分、评价和分级，对重要水生生物的产卵场、索饵场、越冬场等区域，应根据其生存空间需求，统筹规划，保留适当的天然生境河段，限制或禁止开发活动，设置警示标识实施保护，禁止破坏生境的生产经营活动。

8.2.2 应调查鱼类等重要水生生物生活习性，分析其产卵场、索饵场和越冬场需求，以改善水流结构多样性和增加微生物复杂度为原则，确定保护与修复措施类型和方案。

8.2.3 对采砂活动较多或底质破坏较大的地区，宜构建与原有底质相类似的河床结构，营造适宜土著生物生存和繁衍的栖息地条件，改善受损区域底质类型和组成，提高底质异质性。

8.2.4 产卵场修复可选择浮动式人工鱼巢，索饵场修复可选择鱼礁式人工鱼巢或与生态护岸措施相结合的护岸式人工鱼巢。人工鱼巢设置既要考虑其安全性，也要考虑适于鱼类生活习性的水流条件。可参照附录 D。

8.3 洄游通道保护与恢复

8.3.1 应在流域尺度上制定规划，通盘考虑不同洄游鱼类的生活史需求、河湖水系空间格局以及障碍物的空间分布，制定洄游通道保护与恢复的全局性解决方案。对已建过鱼设施运行效果不理想或没有运行的，应通过改造和制定相应运行方案保障鱼类洄游需要；对经综合评估需要设置过鱼设施的应加设。

8.3.2 对于单项水利水电工程项目，应根据上下游水头差、场地空间、目标鱼类物种习性、需要流量等因素，通过经济技术论证，因地制宜确定过鱼设施方案。

8.3.3 过鱼设施包括鱼道、鱼闸、升鱼机及集运鱼系统等，低水头水坝或溢流堰可采用仿自然型鱼道。

8.3.4 进行过鱼设施设计时应掌握主要过鱼种类的生物学特性及行为学特征,包括鱼类尺寸规格、栖息水层、趋流特性、克流能力、洄游模式、洄游行为等,缺少相应资料时应开展相关调查、测试及研究,鱼道设计应符合 SL 609 的相关规定。

8.4 增殖放流

8.4.1 对受水工程建设影响资源量显著下降的重要水生生物,可实施人工增殖放流。

8.4.2 应根据工程河段鱼类资源状况、工程运行后鱼类生境条件、鱼类亲本可获得性、人工驯养繁殖技术基础等情况,合理确定放流对象,并根据水域生境条件、生态承载力、放流对象生存力等因素综合确定放流规模及放流规格。

8.4.3 水生生物增殖放流的水域条件、本底调查,放流物种的质量、检验、包装、计数、运输、投放,放流资源保护与监测,效果评价等应按 SC/T 9401 的相关规定进行。

8.4.4 水电工程鱼类增殖放流站的设计等应符合 NB/T 35037 的相关规定。

8.5 替代生境

8.5.1 当流域内特定物种种群数量极低,且其生存环境被自然或人为因素破坏或不复存在时,应通过替代生境措施对该物种进行迁地保护。

8.5.2 应综合考虑物种生态学特征和生活习性、生境需求、人类活动情况等因素进行替代生境选址,在没有适宜天然生境条件下,可开展人工适宜生境再造。

8.5.3 水生生物的替代生境宜在与已开发工程区相通的支流中选择适宜河段,通过水文水力学法、河流地貌法、栖息地模拟法等判断生境适宜性,划定出限制开发水域范围,作为受开发影响的重要水生生物的替代生境予以保护。

8.6 水温影响减缓

8.6.1 具有水温分层现象的水库,当同期下泄水温接近重要水生生物繁殖温度阈值下限或灌溉农作物发育温度阈值下限,且采取措施后水温恢复值可达到 1℃以上时,应采取分层取水措施。

8.6.2 分层取水设施的水库进水口选型、建筑物布置、水力设计、结构设计、金属结构设计等应符合 NB/T 35053 规定。

8.6.3 应结合水利水电工程运行调度原则、下游河段敏感对象的水温需求和分层取水工程特点,制定安全、合理、经济的分层取水设施运行与管理规程,并根据水温及生物响应跟踪监测成果予以调整。

8.7 下泄饱和和气体影响减缓

8.7.1 采用挑流消能的工程,应根据泄洪方式与频率,明确泄洪对坝下河段水体总溶解气体过饱和的影响程度及范围。

8.7.2 当水工程泄水导致气体过饱和时,应在确保防洪安全的前提下,延长泄洪时间,降低最大下泄流量,优化水库运行方式,并经技术论证后综合运用泄洪深孔、表孔、泄洪洞等多种泄洪方式。

8.7.3 应跟踪监测泄洪期坝下河段总溶解气体组成及浓度,并抽样监测鱼类健康状况,根据大坝泄流气体过饱和情况及其在下游河道的演变趋势,持续优化水库运行方式。

8.8 其他保护措施

8.8.1 应建立防范外来物种入侵和危害长效机制，对引进物种进行生态环境影响评价，实行市场准入，采取隔离或缓冲区等措施，防范外来种入侵对本地生物多样性的影响。

8.8.2 对于在短期内难以实现生物多样性就地保护的物种，应建立种质资源库，对其活体、组织、精子、卵子、基因等种质资源进行保存，在技术成熟时择地对其天然种群进行恢复。

9 水文化传承与水景观构建

9.1 一般规定

9.1.1 应与国土空间规划、城乡文明建设等紧密结合，充分挖掘水文化内涵，保护水文化遗产资源，提出河湖生态系统保护与修复工作中水文化传承和利用的目标与任务，将河湖水域及岸线建成体现人与自然和谐共处、传承民俗风情、彰显历史文化的载体。

9.1.2 在保障防洪安全、维护河湖健康的前提下，应统筹兼顾河湖水域、岸线的生态服务和经济社会服务功能，因地制宜开展水文化设施和水景观构建，促进河湖自然生态、本土水文化、特色水景观等多要素的深度融合。

9.1.3 水文化设施和水景观构建应以恢复和维持人文和自然特色为重点，宜减少布置高度人工化构筑物，并应符合 SL 471 的有关规定。

9.2 水文化传承

9.2.1 应开展流域或区域水文化遗产资源调查评估，分析自然地理、社会变迁以及与治水相关的风土人情、治理工程、治水事迹、诗词文章、民风民俗及水文化典故等，挖掘本土特色的水文化遗产资源，提出水文化保护与传承的内容和要求。

9.2.2 应以提升水文化遗产价值、继承传统智慧为重点，系统挖掘、科学保护、适度修复流域或区域内现存水文化遗产资源，合理利用与展示水文化遗产资源，实现水文化永续传承。

9.2.3 应结合区域文旅观光、休闲康养、科普宣教等需求，依托水利工程、河湖生态景观资源等，提出水文化设施建设布局与要求，因地制宜建设水情科普宣教设施、水文化展示展陈设施和水文化旅游设施等，推动开展体现当地民俗风情的各类涉水活动，提升区域居民对水情和水文化认知、认同水平。

9.2.4 针对受益范围广、社会影响大等综合效益突出的古代和现代水利工程，应充分挖掘其承载的自然生态、科学技术、历史文化、艺术审美价值，通过适度开发拓展观光游赏、文博展示等社会服务功能，丰富水利工程文化内涵，提升水利工程文化品位。

9.3 水景观构建

9.3.1 在严格河湖生态空间用途管控前提下，应按照保障防洪安全、强化河湖保护、维持自然景观、合理且必要建设的原则，以不碍洪为前提，结合人居环境改善和风景名胜区、湿地及游憩公园等建设要求，统筹河湖生态廊道保护、区域水文化保护与传承和滨水景观建设等，以沿江、沿湖为主线构建区域水景观建设总体格局，合理布局亲水公共空间，提升滨水景观品质和生活空间宜居程度。

9.3.2 明确生态驳岸、步道、滨河公园等亲水公共空间建设的措施和要求，并与周边城乡风貌、历史文化、生态环境和园林绿化等相协调和衔接。

9.3.3 严禁建设侵占河湖的实体建筑，步道、滨河公园等建设不得抬高和改变河湖自然滩地高程，不得建设商业开发性质的房屋等建筑。

9.3.4 对具有自然生态或历史人文景观保护要求的河段，实施河湖综合治理应充分考虑周边景观资源的合理保护和利用，主要建筑物、构筑物等的造型、风格、质感、色彩、尺度比例、植被种类、空间布局等应与周边景观、地域文化相互协调。

10 材料和施工

10.1 材料选择

10.1.1 河湖生态系统保护与修复工程应尽量选用易获取、成本低、无污染的自然材料，所选植物类别应因地制宜，优先采用本地种。

10.1.2 采用水质保护与改善措施时，应对所选填料针对特定污染物的吸附和降解功能进行对比分析，必要时开展试验研究，并应防止产生二次污染；小微水体修复区域的土壤应充分利用当地水生土材料，植被类型应根据水位变动情况合理选取。

10.1.3 采用生态型护岸措施时，在满足岸坡稳定安全和生态保护修复需求前提下，可根据岸坡功能定位、水力特性以及与周边自然环境协调等情况，充分利用活体植物和降解性能好的天然柔性材料作为护岸材料，并通过分层剥离、安全储存、合理回用等方式有效利用原坡面开挖表土。

10.1.4 采用卵石群、生态堰或固床技术对河道内地貌单元进行生态重建时，所选择材料应满足防冲刷要求，可合理采用砂砾、卵石、块石、漂砾、圆石、细砂、粘土等多种材料的组合。

10.1.5 构筑人工鱼巢的材料包括结构材料和粘附基质材料。结构材料应选用经试验、检测与评估对水体和鱼类无毒无污染的材料。粘附基质材料应选用无毒无污染、经久耐用、附着面积大、不易腐烂的天然或人工合成材料。

10.2 工程施工

10.2.1 应结合不同工程措施的特点，统筹考虑丰枯水期变化、植被生长、水生生物生活习性等因素，施工前合理安排施工时序，避开保护物种繁殖生长期。施工组织设计可参照 SL 303 相关规定。

10.2.2 生态清淤施工应根据不同条件采用分段、分层、分条施工方法，可将挖泥船和疏浚机具设备在机械产生扰动、疏浚精度控制、头部装置密封、防扩散程度以及机械抽吸能力等方面进行改进后用于生态清淤施工设备；施工过程中应采取措施尽量避免颗粒物再悬浮和扩散，底泥输送中应防止污染五泄漏，输送到堆料场后根据底泥性质采取适当措施进行处置。

10.2.3 在河道内采取水体水质维护或地貌单元生态重建措施时，宜利用枯水期低水位施工或采取围堰导流的施工方式，减少施工过程中对河道行洪能力的影响，并防止产生冲刷破坏，施工期导流施工可参照 SL 623 相关规定。

10.2.4 进行生态护岸工程建设时，应避免汛期施工，施工过程中应避免对反滤层产生损伤；在常水位以上部位采取植物护岸措施时应回覆原坡面表土；在常水位以下或处于周期性淹没的洲滩等区域施工时应减少对当地水生土的大幅扰动。

10.2.5 浮动式人工鱼巢的整体结构应在现场制作安装，基质材料可预制后在现场进行拼装。鱼礁式鱼巢的投放，对于通航的河流，可采用从船台直接投放或用吊机把礁体吊至水面脱钩投放的方式；对于不通航河流，可采用汽车运输至河岸边，然后用吊机把礁体吊至水面脱钩投放的方式。

11 监测和管理

11.1 河湖生态监测

11.1.1 河湖生态监测的内容应根据生态系统保护和修复的目标、指标综合确定，可包括水文情势、水环境、地貌多样性和生物群落多样性等方面，针对具体监测目标制定监测计划。

11.1.2 生态监测应在河湖生态现状调查评价基础上进行，并在施工期和竣工后运行期连续进行。工程竣工后至少应保证连续 3 年的监测时间。应符合 SL492 相关规定。

11.1.3 应根据监测内容形成监测指标体系，并建设生态监测站网。生态监测站网布设宜采取连续定位观测站点、临时性监测站点和周期性普查相结合的方式。

11.1.4 水文情势监测应符合 SL 58 相关规定，并应制定生态调度、生态流量相关跟踪监测计划应结合河湖生态流量监管、考核及适应性管理要求，针对水利水电工程、水文站点等控制断面，提出生态流量监测能力建设措施，明确监测项目和频次要求等。

11.1.5 水环境监测应符合 SL 219 相关规定，包括布设监测断面，确定监测项目、监测频次和监测方法等。对于湖库应监测水温分层情况，并应针对工程泄洪期制定溶解气体过饱和监测方案，监测坝下河段总溶解气体组成及浓度。

11.1.6 地貌多样性监测应符合 SL 383、SL 257 相关规定，并宜对河流的深潭、浅滩、故道、洲滩等地貌单元变化情况、河湖水系连通情况进行定期监测。

11.1.7 生物多样性监测应符合 SC/T 9102.3 相关规定，监测内容和监测时期应考虑与重要水生生物栖息地及生物多样性保护措施的相关性。

11.1.8 河湖生态系统保护与修复工程应在分部、单元、合同工程验收及相关阶段验收工作完成后，以施工期间和合同工程验收时的综合监测结果作为本底值进行生态保护与修复效果专项验收，然后再进行工程竣工验收，并应符合 SL 223、SL 670 相关规定。

11.1.9 对于重要的生态调度，应进行全过程专项生态监测，监测数据应为建立水文-生态响应和生态调度效果评估提供基础和定量依据。

11.2 后评估

11.2.1 应在生态监测和调查基础上，分析河湖生态系统演替趋势，并与前期河湖生态现状综合评价相对应，根据不同工程类型的特点开展工程后评估工作，可参照建设工程环境影响评价和 SL489 相关规定执行。

11.2.2 对于水系生态连通工程，后评估工作重点应针对连通工程实施后河湖水质污染状况改善、生态流量保障、生物多样性保护，以及工程实施带来的社会效益和经济效益等方面，选取代表性指标进行效果评估。

11.2.3 生态调度效果评估宜通过评估调度实施前期、中期、后期的水文、鱼类早期资源量和鱼类繁殖群体动态，对调度效果进行评估。

11.2.4 过鱼设施效果评估宜通过评估过鱼设施建设后的实时过鱼情况，比较过鱼设施建设前后坝上和坝下的鱼类群落结构，对过鱼效果进行评估。

11.2.5 增殖放流效果评估宜通过评估放流对象的物理、化学和遗传标志-回捕情

况，比较增殖放流实施前后放流水域鱼类群落结构，对放流效果进行评估，应按照 SC/T 9401、NB/T 35037 相关规定执行。

11.3 河湖生态综合管理

11.3.1 河湖生态综合管理应包括全过程管理、竣工后运行维护、制度机制、应急监控、科研与推广等多方面的能力建设。

11.3.2 应建立河湖生态系统保护与修复工程全过程管理机制，根据生态监测和评估的结果开展适应性管理，不断优化和改进生态保护和修复措施和方案。

11.3.3 河湖生态保护与修复工程建设过程中应考虑建设后的运行维护需求，竣工验收后应建立日常运行维护的保障措施，针对所采用的生物措施提出具体维护及养护办法，持续进行后期的管护和保育等工作，确保河湖生态保护与修复工程发挥最大效益。

11.3.4 应提出多目标联合调度管理、监测预警、补偿激励、责任考核等制度和机制建设要求，明确生态流量保障和监管责任主体；对涉及多个利益相关方或流域上下游多个工程的区域，应推动建立生态流量调度决策会商机制。

11.3.5 应加强河湖生态保护与修复工程在超标洪水、极端气温、严重干旱、突发水污染事故等特殊条件下的应急监控能力，制定应急预案和应对措施，建立人员、物资储备机制和技术保障体系，提高应急能力。

11.3.6 应结合不同地域河湖生态保护与修复的功能需求，开展技术创新、科研推广和实际应用，并通过多学科交叉、多行业合作和多部门协同共同推进河湖生态系统保护与修复工作。

附录 A 现状调查表样

表 A-1 河道地貌特征调查表

河段 _____ 桩号 _____ 年 ____ 月 ____ 日

调查项目	地貌特征							备注
	深潭	浅滩	边滩	沙洲	回水区	牛轭湖故道	其它	
位置								
大小								
数目								

表 A-2 河道平面形态调查表

河段 _____ 桩号 _____ 年 ____ 月 ____ 日

曲率半径 (m)	中心角 (°)	河湾幅度 (m)	河湾跨度 (m)	弯曲段长度 (m)	弯曲系数	备注

表 A-3 洲滩形态特征勘测调查表

河段 _____ 洲滩 _____ 桩号 _____ 年 ____ 月 ____ 日

位置	类别	面积 (km ²)	洲顶高程 (m)	洲滩组成	植被覆盖情况	备注

表 A-4 河流-湖泊连通性调查表

河段 _____ 年 ____ 月 ____ 日

湖泊名称	面积	容积 a	连通特征 (历史/现状)										阻隔原因		
			湖泊面积	湖泊容积	进水通道	出水通道	连通方向			连通延时		换水周期	自然	人为	
							单	双	网	常年	间歇				

a: 湖泊容积等于湖泊各深度容积之和。

表 A-5 河湖水系动态格局调查表

河段 _____ 年 ____ 月 ____ 日

时期	干流流量	湖泊			河滩		
		水位	面积	连通状况	水位	水域面积	连通状况
丰水期							
枯水期							
变化率							

表 A-6 入河排污口调查表

序号	排污口名称	排污口位置	经度	纬度	排污单位	排入河流	下一级河流	排污口类型 ¹	入河方式 ²	排放方式 ³	污水量 m³/d	主要污染物排放浓度(mg/L)					备注
												COD	氨氮	TN	TP	...	
注 1：排污口类型主要包括：工业、城镇生活、污水处理厂退水、混合等；																	
注 2：入河方式：明渠、暗管、泵站、涵闸等；3、排放方式：连续、间歇。																	

填表：

校核：

调查日期：

表 A-7 城市地表径流（初期雨水）污染调查表

序号	市、县、区	常住人口	建成区 面积	绿化 面积	硬质地面 面积	水面 面积	雨污排水方式		排水去向		降雨径 流系数	备注
			(km²)				分流	合流	雨水管网	污水管网		

填表：

校核：

调查日期：

表 A-8 底泥监测调查表

水域名称	调查区域（河段）	底泥面积	底泥厚度	底泥监测指标					备注
				有机质	TN	TP	重金属	...	
		（km ² ）	（cm）	（%）	（mg/kg）				
注：重金属指标参照 GB3838 的相关规定。									

填表：

校核：

调查日期：

表 A-9 水生生物分布调查表

水域名称	调查区域（河段）	经纬度	浮游植物		浮游动物		着生藻类		底栖动物		大型水生维管束植物		鱼类		备注
			优势种	生物量	优势种	生物量	优势种	密度	优势种	生物量	优势种	生物量	优势种	渔获量	
			（密度%）	（mg/L）	（密度%）	（mg/L）	（密度%）	（cells/m ² ）	（密度%）	（g/m ² ）	（密度%）	（g/m ² ）	（重量%）	（kg）	

填表：

校核：

调查日期：

表 A-10 河湖沿岸带生物分布调查表

水域名称	调查区域（河段）	经纬度	植被		水禽			其它重要生物			备注
			优势种	优势种	种类	数量	栖息范围	种类	数量	栖息范围	
			（密度%）	（密度%）		（只）	（经纬度）		（只）	（经纬度）	

填表：

校核：

调查日期：

附录 B 生物完整性评价

B.0.1 生物完整性评价根据评价对象的不同,可分为鱼类生物完整性指数(F-IBI)、底栖动物生物完整性指数(B-IBI)和浮游生物生物完整性指数(P-IBI)等评价指标体系,常用指标类型包括物种丰富度指标、群落结构组成指标、群落营养结构指标和其它指标,见表 B-1。

B.0.2 开展生物完整性评价时,宜根据评价区域特征和关注的评价对象选取适宜的评价指标体系,结合区域历史资料和监测数据,通过敏感性分析、生物指数与环境指标间的相关性分析、生物指数间的相关性分析,参考点和受损点的选择,候选指标判别能力、冗余度和变异度分析,以及入选指标标准化,筛选出能综合地体现生物群落的环境响应,并对大部分环境胁迫敏感的指标,构建针对性的生物完整性评价指标体系。

表 B-1 生物完整性评价的常用指标

指标类型	鱼类 生物完整性指标	底栖动物 生物完整性指标	浮游生物 生物完整性指标
物种丰富度指标	本地种类数占期望值的比例 非本地种类数比例 单位努力捕捞量	总个体数/总种类数 生物多样性指数 优势类群比例	藻类种类数 浮游动物种类数 原动物种类数 轮虫种类数 枝角类、桡足类种类数 藻类生物多样性指数 藻类密度 原动物密度 轮虫密度 枝角类、桡足类密度 浮游动物密度
群落结构组成指标	鲤科鱼类比例 鳊科鱼类比例 鲴科鱼类比例 鮎科鱼类比例 平鳍鳅科鱼类比例	襁翅目比例 蜉蝣目比例 毛翅目比例 摇蚊科比例 双翅目比例 甲壳类和软体动物比例 寡毛类比例 非水生昆虫比例 摇蚊类幼虫比例 环足摇蚊+摇蚊属比例 蜉蝣目+襁翅目+毛翅目比例	蓝藻丰度 硅藻商

指标类型	鱼类 生物完整性指标	底栖动物 生物完整性指标	浮游生物 生物完整性指标
群落营养 结构指标	杂食性鱼类比例 底栖动物食性鱼类比例 顶级肉食性鱼类比例	撕食者比例 滤食者比例 收集者比例 捕食者比例 刮食者比例	枝角、桡足类/浮游动物密度比 枝角、桡足类/浮游动物生物量比 不可食藻类/总藻类密度比 浮游动物/浮游植物密度比 浮游动物/浮游植物生物量比 藻类平均体积 浮游动物平均体积
其它指标	耐受性种类比例 敏感种类比例 外来种比例 天然杂交个体数比例 感染疾病和畸形个体数比例	敏感类群分类单元数 耐污值类群比例	水华藻类丰度 潜在产毒藻类丰度

附录 C 生态型护岸技术

C.1 天然植物类

C.1.1 天然植物类护岸技术有联排条捆、植物纤维垫（卷）、植物梢料、植物-土工材料复合式等多种类型。

C.1.2 天然植物类护岸技术适用于坡比小于1:2.5，行洪流速小于1.0 m/s的坡式护岸结构和其他护岸型式中的斜坡部位。

C.1.3 植物种类选择原则，宜选择乡土植物。应根据河岸的主体功能（护岸固堤、水土保持、净化水体、遮荫作用、景观美学价值等），选择具有相应功能的植物。草种特性应满足耐旱、耐涝、成活率高、蔓面大、根部发达、茎低矮强壮、多年生长等要求。应根据不同高程和水位选择中生植物、湿生植物、水生植物，其中水生植物包括沉水植物、浮叶植物和挺水植物。

C.1.4 常水位以上护坡表面可种植或扦插柳树等根系发达、耐水性较强的植物，其根部具有固土功能，枝叶具有遮阴功能，并能增加护岸的景观效果。常水位以下部护脚部分的结构形式应根据岸坡地形地质情况、水流条件和材料来源，经技术经济比较选定。护脚设计应按GB 50286的有关规定执行。

C.1.5 天然植物可于自然材料（如黄麻、椰壳纤维）或土工格室、三维土工网、土工袋等土工材料组合形成毯、垫、排、墙等多种结构型式，用于水流和波浪作用的水陆交错带等部位的局部加强防护，在组合捆扎过程中可填入熟土料和活芦苇根等，并结合活柳桩固定，其结构稳定性计算包括抗漂浮计算、抗掀起计算、抗排体顺坡下滑核算及压重计算等。土工材料的保土性、透水性、防堵性、撕裂强度等指标应满足GB/T 50290的要求。

C.2 石笼类

C.2.1 石笼类护岸技术是用铅丝编成六边形网目的方形或圆形笼子，笼中填充块石或卵石，置于岸坡上用以护岸的构件，根据现场情况可采用重力式、阶梯式及贴坡式等多种型式。

C.2.2 石笼类护岸技术适用于岸坡坡度1:1~1:2的河段，为防止铅丝严重锈蚀，对于pH值<5、氯离子浓度>450mg/L或土壤为黑色有机质混合土壤的河段不宜采用铅丝笼。

C.2.3 贴坡式石笼垫适用于高流速、冲蚀严重、岸坡渗水多的缓坡河岸。石笼垫在坡脚处水平铺设长度L主要与该处最大冲刷深度Z和石笼垫沿坡面抗滑稳定性两个因素有关，水平段的铺设长度应大于或等于坡脚处最大冲刷深度的1.5~2.0倍，并满足石笼垫沿坡面的抗滑稳定系数不小于1.5的要求，取二者大值为水平铺设长度。

1 计算坡脚处最大冲刷深度Z，应符合GB50286相关规定。

2 石笼垫抗滑稳定分析。石笼垫护坡不允许在自重作用下沿坡面发生滑动，要求抗滑稳定安全系数 $F_s \geq 1.5$ ， F_s 根据静力平衡条件计算如下式：

$$F_s = \frac{L_1 + L_2 \cos \alpha + L_3}{L_2 \sin \alpha} f_{cs} \geq 1.5 \quad (C.2.3-1)$$

其中:

$$\cos \alpha = \frac{m}{\sqrt{1+m^2}} \quad (\text{C.2.3-2})$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}} \quad (\text{C.2.3-3})$$

$$f_a = \tan \theta \quad (\text{C.2.3-4})$$

式中 L_1 、 L_2 、 L_3 ——笼垫堤顶段、斜坡段、水平段长度, m;

α ——岸坡角度;

m ——岸坡坡比;

f_a ——石笼垫与边坡之间的摩擦系数;

θ ——坡土的内摩擦角。

3 石笼垫厚度确定。石笼垫厚度主要由水力特性确定。宜为17~ 30 cm, 水力特性考虑流速、波浪高度及岸坡倾角两个因素, 二者计算结果取大值。按下式计算:

1) 水流冲刷影响:

$$D = 0.035 \frac{0.75V_c^2}{0.07K_s 2g} \quad (\text{C.2.3-5})$$

其中:

$$K_s = \sqrt{1 - (\sin \alpha / \sin \phi)^2} \quad (\text{C.2.3-6})$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}} \quad (\text{C.2.3-7})$$

式中 D ——石笼垫厚度, m;

V_c ——平均流速, m/s;

g ——重力加速度, $g=9.81\text{m/s}^2$;

K_s ——坡度参数;

α ——岸较角度;

m ——岸坡坡比;

ϕ ——石笼垫内填石内摩擦角。

2) 考虑波浪高度及岸坡影响:

$\tan \alpha \geq \frac{1}{3}$ 时

$$D \geq \frac{H_s \cos \alpha}{2} \quad (\text{C.2.3-8})$$

$\tan \alpha < \frac{1}{3}$ 时

$$D \geq \frac{H_s \sqrt[3]{\tan \alpha}}{4} \quad (\text{C.2.3-9})$$

式中 D ——石笼垫厚度, m;

H_s ——波浪设计高度, m;

α ——岸坡角度。

C.2.4 石笼内部石块应尽量选择不规则的块石或卵石。根据不同应用类型, 块石粒径的取值范围见表C.2.4。

表 C.2.4 石笼内块石粒径参考值

石笼类型	最小粒径/cm	最大粒径/cm
构成石笼墙的方形石笼	15	30
17 cm 厚的石龙垫	7.5	12
23 cm 厚的石龙垫	7.5	15
30 cm 厚的石龙垫	7.5	20

C.2.5 石笼与岸坡土体间应设置碎石或土工布反滤层, 避免淘刷侵蚀。可在石笼上进行插条 (多用柳枝), 促进植物生长。植物插条长度宜为0.5~0.6 m, 直径10~30 mm。种植深度应达到反滤层下面10~20 cm, 露出地面约5 cm, 与坡面基本垂直。

C.3 木材-块石类

C.3.1 木材-块石类护岸技术包括木框块石、木工沉排、抛石等类型。

C.3.2 木框块石护岸技术是由未处理过的原木相互交错形成的箱型结构, 在其中充填碎石和土壤, 并扦插活枝条, 形成重力式挡土结构。适用于陡峭岸坡河段, 可减缓水流冲刷, 促进泥沙淤积, 营造自然景观。木框可分为单坡木框和双坡木框, 前者靠近岸坡坡面一侧柱木为垂直方向, 后者为斜向。

C.3.3 木工沉排是在井字形原木框架内填充块石或卵石的结构物。适用于河道坡面防冲护脚以及防止河底泥沙淘冲, 具有较强的抗冲刷性能, 可抵抗水流拖曳力, 为鱼类和其他水生生物提供栖息条件。

C.3.4 抛石护脚是平顺坡护岸下部固基的主要方法, 也是处理崩岸险工的一种常见、优先选用的措施。抛石也可在水位变动区与活树桩等材料结合使用, 在保证防护安全前提下为鱼类及其他水生生物提供栖息地。设计要点包括抛石护脚范围确定、抛石粒径选择、抛石堆积厚度和稳定性坡度确定、抛石区反滤层设置等。

C.4 多孔透水混凝土构件

C.4.1 多孔透水混凝土构件包括铰接混凝土块、植生混凝土、半干砌石、生态砌块等类型。

C.4.2 铰接混凝土块是一种连锁型预制混凝土块铺面结构, 由多组标准的预制混凝土块用钢缆或聚酯缆绳连接, 或通过混凝土块相互咬合连接构成, 结构底面铺设土工布或碎石作为反滤层和垫层。适用于流速较高和风浪淘刷侵蚀严重、坡面相对平整的河道岸坡。混凝土块为空心构件, 其孔洞面积满足充填表土或砾石

材料要求，允许植物生长，改善岸坡栖息地条件，提升自然景观效果。

C.4.3 植生混凝土将连续粒级的粗骨料、细骨料、生态胶凝材料等按比例范围进行配合，然后进行搅拌，浇筑及自然养护之后所形成的多孔质混凝土结构，可采取框格梁式、土工格室加筋等不同形式。植生混凝土7d抗压强度应不小于6 MPa，28 d抗压强度应不小于8 MPa；有效孔隙率应不小于20%；透水系数不小于10 mm/s，混凝土孔隙内植生基材的碱度技术指标范围为7.0~8.0。

C.4.4 半干砌石是在岸坡施工现场浇筑混凝土格栅，在其上放置卵石或块石，石料间的空隙一半用混凝土填筑，一半填入土壤及柳枝等插枝植物。既具浆砌石结构的优点，整体性强能够抗冲刷，又具干砌石结构的优点，空隙多可以填土生长植物，为鱼类和昆虫栖息创造条件，同时营造自然景观，避免浆砌石结构的单调化。

C.4.5 生态砌块护岸技术包括渗透植生砌块、自嵌式挡墙、生态砖、鱼巢砖等多种型式，适用于对护岸有抗冲刷要求，兼有景观、生态等功能的河段，可用于直墙型岸坡防护，也可用于斜坡型岸坡防护。生态砌块护岸挡墙应进行抗滑、抗倾、抗浮、渗流及基础承载力稳定计算，相关计算应符合SL 379有关规定，并应对生态砌块护岸墙体内部结构进行如下分析：墙体砌块层间滑移稳定计算、砌块绑扎材料抗拉强度验算、砌块抗剪强度验算、砌块绑扎材料抗剪能力验算等。

C.4.6 坡面生态砌块防护设计应进行砌块抗风浪冲击、砌块稳定及坡体抗滑稳定计算。坡面坡度缓于1:2时可不进行坡体稳定计算。砌块重量及厚度可按GB 50286附录D中人工块体相应公式计算。砌块厚度也可按下式计算：

$$D = \frac{H_d \xi^b}{K_r \varphi \cos \alpha} \quad (\text{C.4.6-1})$$

$$\xi = \frac{1.25T}{m\sqrt{H_d}} \quad (\text{C.4.6-2})$$

式中 D ——砌块厚度，m；

H_d ——设计波高，m；

K_r ——护面稳定系数，由试验确定；

T ——平均周期，s；

ξ ——海波形态参数；

b ——海波与护面材料之间的相互作用系数，取2/3；

α ——护坡的坡角； φ 为强度系数，由实验确定；对带有绳索砌块和碎石

垫层的铺面系统， $\varphi \cos \alpha = 3.0 \sim 8.0$ 。

C.5 组合式

C.5.1 由于每种生态型护岸技术有不同适用范围，可将多种护岸技术进行组合使用，达到稳定安全、生态修复和景观提升的综合作用。

C.5.2 应根据工程现场流速、水深、冲刷、滑坡风险、材料来源等多种因素，因地制宜设计组合式生态型护岸结构。

C.6 反滤层设计

生态型护岸的一个技术关键是采用土工织物或碎石作为反滤层和垫层，防止河道岸坡土体颗粒在水流、波浪或坡面渗流的作用下通过防护面层空隙流失发生侵蚀破坏，导致防护结构整体丧失稳定性。土工织物滤层的设计应综合考虑被保护土的性质、滤层材料的性质、渗透水流的特性和被保护土与滤层的系统特性，并遵循四条准则：保土性准则、透水性准则、防堵性准则和强度准则。

C.6.1 保土性准则：土工织物的孔径必须满足一定的要求，防止被保护土土粒随水流流失。一般按土工织物有效孔径与土的特征粒径之间关系表征，土工织物有效孔径应符合下式：

$$O_{95} \leq n d_{85} \quad (\text{C.6.1-1})$$

式中： O_{95} 为土工织物的等效孔径（mm）； d_{85} 为被保护土的特征粒径，即土中小于该粒径的土质量占总质量的 85%，采用试样中最小的 d_{85} （mm）； n 为与被保护土的类型、级配、织物品种和状态有关的经验系数，按表 6-3-4 采用。当预计土工织物连同其下部被保护土体可能产生一定位移时， n 值应采用 0.5。土的不均匀系数 C_u ，应按下式计算：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{C.6.1-2})$$

式中： d_{60} 、 d_{10} 分别为小于该粒径的土质量占总土质量的 60%和 10%。

表 C.6.1-1 建议的经验系数 n 取值

被保护土细粒 ($d \leq 0.075\text{mm}$) 含量	土的不均匀系数或土工织物类型	n 值
$\leq 50\%$	$2 \geq C_u \geq 8$	1
	$4 \geq C_u > 2$	$0.5 C_u$
	$8 > C_u > 4$	$8/C_u$
$> 50\%$	有纺织物	1
	无纺纺织物	1.8

C.6.2 透水性准则：土工织物的渗透系数应大于土的渗透系数（具有适宜的透水能力），保证渗流水通畅排走。可首先利用式C.6.2-1和式C.6.2-2计算出土工织物提供的透水率 ψ_a 和要求的透水率 ψ_r ，然后利用式C.6.2-3进行判定。

$$\psi_a = \frac{k_v}{\delta} \quad (\text{C.6.2-1})$$

$$\psi_r = \frac{q}{\Delta h A} \quad (\text{C.6.2-2})$$

$$\psi_a \geq F_s \psi_r \quad (\text{C.6.2-3})$$

式中： k_v —土工织物的垂直渗透系数（cm/s）； δ —土工织物厚度（cm）； q —流量（cm³/s）； Δh —土工织物两侧水头差（cm）； A —土工织物过水面积（cm²）； F_s —安全系数，应不小于 3。

C.6.3 防堵性准则：土工织物应具有高孔隙率，且分布均匀，适宜水流通，多数孔径应足够大，允许较细的土颗粒通过，防止被细粒土堵塞失效。土工织物防堵性要求其孔径符合以下条件：

（1）当被保护土级配良好、水力梯度低、流态稳定、维修费用小且不发生淤堵时：

$$O_{95} \geq 3d_{15} \quad (\text{C.6.3-1})$$

式中： d_{15} —被保护土的特征粒径（mm），即小于该粒径的土质量占总土质量的 15%。

（2）当被保护土易发生管涌、具有分散性、水力梯度高、流态复杂、维修费用大时，若被保护土的渗透系数 $k_s \geq 10^{-5} \text{cm/s}$ ：

$$GR \leq 3 \quad (\text{C.6.3-2})$$

式中：GR—梯度比，指水流垂直通过土工织物与 25mm 厚土层的水力梯度与通过上覆 50mm 厚土层的水力梯度的比值。

若被保护土的渗透系数 $k_s < 10^{-5} \text{cm/s}$ ，需应用现场土料进行长期淤堵试验，观察其淤堵情况。

C.6.4 强度准则：土工织物应具有足够的强度，以抵御施工干扰破坏，同时应利于植物可长穿或可扎根，其不仅与土工织物的等效孔径、厚度、构造等特性有关，还与使用地点的气候条件、降水、土壤湿度、养分含量等因素相关。

附录 D 人工鱼巢技术

D.1 浮动式人工鱼巢

D.1.1 浮动式人工鱼巢由框架、锚、连接件和产卵基质组成。

D.1.2 浮动式人工鱼巢框架宜为竹制框架，每个框架单独设置，并用单个锚固定在水中。产卵基质可采用树枝、棕榈皮和生麻丝等，将它们捆扎成束状，用连接线系在框架下面。框架间用连接件连接，可连接成单层或多层框架结构。

D.1.3 浮动式人工鱼巢每束鱼巢的间距宜为 1 m 左右，框架面积宜为 5 m×10 m 左右。鱼巢框架至水底宜为 1~2 m 深，离水岸 5 m 左右，随水位涨落而上下浮动。

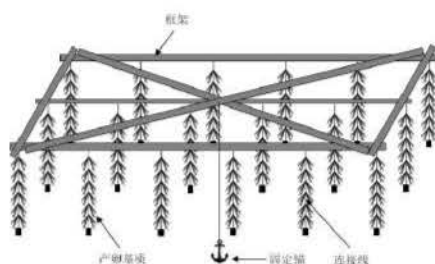


图 D.1.1 浮动式人工鱼巢结构示意图

D.2 鱼礁式人工鱼巢

D.2.1 鱼礁式人工鱼巢可设置成均匀分布的密集小型人工鱼礁群和分散的大型鱼礁。整体礁区的长轴方向设计应与水流方向平行。投放水域底质应避免淤泥较深区域，水深应根据礁区环境及生物资源条件决定，宜为 15~30 m。

D.2.2 人工鱼礁群各单位礁体间距可设置为单位礁体边长的 2 倍左右。单位礁体边长宜为投放水深的 1/5~1/10。礁体主框架宜为正方体、长方体或四方台的钢筋混凝土框架结构，结合开洞的混凝土空心管。礁区调控面积按投放水域面积核算，礁区设置面积宜为调控面积的 1/2 左右。

D.2.3 大型鱼礁的单位礁体体积宜在 60 m³ 以上。各单位礁体间距设置在 50 m 以上。礁体主框架宜为正方体、长方体或四方台的钢筋混凝土框架结构，并在礁体底梁交接处设三角型护角底板以减缓礁体沉降，也可利用废旧渔船、趸船，或和地形地势结合构建。

D.3 护岸式人工鱼巢

D.3.1 护岸式人工鱼巢由斜坡式护岸基础和沿斜坡式护岸基础自下而上码放的单层或多层鱼巢单元体组成。

D.3.2 多层鱼巢整体为台阶式结构，每层鱼巢由多个鱼巢单元体预制件沿斜坡式护岸基础长度方向依次连接而成。

D.3.3 鱼巢单元预制件为混凝土框架式结构，鱼巢单元体预制件包括顶板、底座、多根斜柱、边沿立柱和中间立柱支撑。顶板为透水板，底座为方格网状结构，顶板的面积小于底座的面积，顶板通过多根斜柱、边沿立柱和中间立柱支撑在底座上。鱼巢单元体预制件内应设有附着基质，各层鱼巢与斜坡式护岸基础之间的空隙以及各层鱼巢的底部上应设置鹅卵石。

D.3.4 鱼巢单元体顶部应覆盖土壤层，土壤层上根据水位波动情况应选择种植不同类型的草本植物。消落区应选择具有较强的耐水淹能力，出水后能自然恢复生长的植物，常见种类为石菖蒲、香附子、狗牙根等。沿岸水域可选择莲藕、菖蒲、芦苇等具有一定表面积和扩散体积，便于鱼类隐蔽的水生植物。

标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

河湖生态系统保护与修复 工程技术导则

SL/T 800-2020

条文说明

目 次

1 总则..... 40

3 河湖生态系统调查与评价..... 41

4 设计原则..... 46

5 河湖生态流量保障..... 48

6 水质保护与改善..... 55

7 河湖地貌形态保护与修复..... 60

8 重要水生生物栖息地与生物多样性保护..... 72

9 水文化传承与水景观构建..... 75

10 材料和施工..... 77

11 监测和管理..... 79

1 总 则

1.0.1、1.0.2 由于河湖生态系统具有很强的复杂性和不确定性，不同地域的气候、水文等自然条件不同，污染原因和人类活动规律也有很大差异，决定了河湖生态系统保护与修复工程技术的多样性。针对特定河湖的生态保护与修复需求，还需根据不同河湖的现实情况，因地制宜，探索研究适合于本地区、本流域的河湖生态系统保护与修复技术和方法，分区域提出适用技术的指导名录。

1.0.3 河湖生态系统保护与修复工程需在满足人类社会需求的同时，兼顾河湖生态系统健康与可持续性需求。

3 河湖生态系统调查与评价

3.1 一般规定

3.1.1、3.1.2 进行河湖生态系统历史和现状调查是河湖生态系统保护与修复工程实施的基础工作。可通过收集水利、环保、农业、林业等有关部门的监测资料或技术报告获得相关信息，部分资料可采用 3S（GIS、GPS、RS）等技术方法获取。基本资料收集完全后，需检查其是否满足工程要求，明确资料来源，并对其正确性、相互协调性和一致性进行合理性分析，识别生态要素变化规律。当资料不能满足工程要求时，需进行补充监测和调查。

3.1.3 河湖生态系统现状与历史状况的对比分析是论证河湖生态修复必要性的基础，其目的是识别河湖生态系统的演进趋势，判断生态系统总体处于退化或严重退化还是基本维持动态平衡。当河湖生态系统退化至一定程度，即靠河湖本身自我修复能力已经无法恢复的情况下，需要进行河湖生态修复。

3.2 水文水资源

3.2.2 河流水文情势的动态特征在维持河流生物群落多样性和生态系统完整性方面发挥了至关重要的作用。河流水文过程调查分析的目的是评估当前水文过程偏离自然水文过程的程度，识别改变程度较大的水文指标，基于这些水文指标与河流生态响应之间的相关关系预测可能产生的生态效应，指导河湖生态保护与修复工作。生态水文学中通常用流量、频率、发生时机、延时和变化率 5 类变量反映水文情势，进而研究生物对水文变量的响应。生态水文分析通常把年内流量过程划分为 3 个流量段，即基流、高流量和洪水脉冲流量，3 个流量段具有不同的生态功能。基流是指低流量，其持续时间相对较长。基流是维持水生生物生存和维持栖息地的基本条件，也是推求生态基流的主要依据。高流量是相对于基流而言，相当中等量级流量。高流量过程控制着包括侵蚀、泥沙输移和淤积在内的河流地貌过程。基于流量过程对河床形态影响能力的认识，高流量对应造床流量概念。所谓造床流量是能够长期维持河流形态的流量。洪水脉冲是指高量级流量，延时较短。洪水脉冲对泥沙及营养物的输移起重要作用，也是影响河漫滩地貌构成的重要驱动力。

3.3 水质状况

3.3.2 进行水体质量调查时，可结合使用人工采样、在线采样和遥感监测等技术，充分发挥高光谱分辨率遥感技术在黑臭水体调查等特定领域的应用优势。

3.3.3 进行沉积物污染状况调查时，对有工业、矿业污染的水域和无此类污染的水域一般需分类确定调查项目。

3.3.4 点源、面源、内源和移动源调查内容包括：

（1）点源调查主要调查工业和生活污染源产生的工业废水、城市生活污水及其入河湖排放口情况。调查内容主要包括城镇生活及工业排污入河排污量、排放标准、主要排放污染物、排放去向情况、排口位置等。对直接排放入河湖的现状排污口的数量与具体位置、废水排放量、污水来源、主要污染物排放浓度等进行系统调查。

(2) 面源调查主要调查城市地表径流污染、农村生活污染、畜禽养殖污染、农田化肥和农药污染、水土流失等污染源。城市地表径流污染调查包括城市建成区面积、初期雨水形成过程及主要污染物浓度等。农村生活污染调查包括村庄分布及居住区面积、人口情况,生活垃圾种类、数量和处置方式,农村生活污水处置方式,村庄范围内工业污染及防治情况等。规模畜禽养殖企业调查包括畜禽养殖企业规模、种类,废水和固废产生及排放等。化肥农药污染调查包括农田面积、农业种植结构、土地利用状况和农药及化肥的施用情况等。水土流失调查包括水土流失面积、流失强度、营养盐元素等。

(3) 内源调查主要调查底泥污染、水产养殖污染等污染源。底泥污染调查主要包括底泥形成机理、底泥淤积分布区域,底泥淤积面积、淤积厚度、底泥中营养元素、重金属及其他污染物质的分布等。水产养殖污染调查主要包括水产养殖面积、养殖种类、养殖密度、投放饵料种类、频次等。

(4) 移动源调查要调查江河、湖泊航运污染源。主要内容包括船舶类型、运输类型、货运量,港口码头污水、固体废弃物接收处理设施设备及运行情况等。

(5) 在污染负荷分析计算方面,需在陆域控制单元体系下分析评估与特征污染物相关的污染源分布状况与排污强度,分析污染源对河湖水系关键控制断面水质的季节性影响特点。

3.3.5 需在水体质量调查、污染源调查统计分析的基础上,进行河湖水系控制断面水质变化分析,开展水质综合评价,分析河湖污染成因,涉及到重金属等有毒有害污染物的须溯源。在控制断面水质变化分析方面,需在现有数据和补充监测基础上,分析河湖水系内所有控制断面水质指标的时空变化特征,识别出上下游、干支流中的关键问题断面及其特征污染物的周期性变化规律,并建立陆域污染负荷排放与控制断面水质指标之间的定性或定量关系,找出导致水质超标的主要污染源、污染项目和超标原因,并定位到具体的空间区域,必要时需开展入河排污口及河湖水质水量同步监测,研究确定特征污染物与河流水质过程的响应参数。

3.4 河湖地貌

3.4.1 河湖地貌调查方法要结合河势演变、现状资料和现场勘察进行,并可通过遥感、全球定位系统、地理信息系统、无人机、数字高程模型等技术获取和分析河湖地貌空间数据。

3.4.2 河湖水系连通包含物理通道连通和水文连通两个方面。其中,水文连通状况按照季节变化特点可分为常年连通和间歇性连通,按照水流方向又可分为单向、双向和网状等类型。由于年内水文周期性变化包括汛期涨水-退水过程,使得一部分河湖水系之间联通性呈现间歇性状态。另外,出于防洪和引水需要调控闸坝,也会使河湖水系之间呈现间歇性连通状态。按丰水期和枯水期两种情况调查连通性,并且在间歇性连通中区分自然原因还是人为原因。河道演变情况、河湖水系历史变迁情况、小流域坡面侵蚀情况

河道演变和河湖水系历史变迁情况调查主要通过收集、整理历史记录和现状地形,绘制河流平面形态和典型横断面的多年变化图,并重点关注因大坝、堤防、船闸等建筑物的修建和采砂、取土、疏浚等人类活动所引起的河流地貌形态变化。

湖泊基本情况包括湖泊名称、湖泊类型、湖底高程、流域面积、流域多年平均降雨量、湖泊与河流连接状况、湖泊主要功能、水功能区、自然保护区和水利工程设施等。按照湖泊成因,湖泊分为冰川湖、构造湖、河成湖、滨海湖、火山口湖和岩溶湖等类型。

3.4.3 河流分级可采用 Strahler 方法，明确目标河段所处的级别，河流分类可按照顺直微弯河型、蜿蜒河型、辫状河型、网状河型和游荡河型进行划分。横断面特征调查的主要内容包括断面类型、尺寸、形状、水力糙率等，平面形态特征调查包括河流蜿蜒度、等，可用河弯曲率半径、中心角、跨度和振幅等参数表示。纵剖面特征调查包括纵向形态、河道坡降变化情况等。

地貌过程分析主要包括河床形态变化和河势变化。河床形态变化指的是河床形态平面变迁、横断面形态变化、河床组成及河床比降的调整等。河势变化指的是河道深泓线位置、走向以及洲滩的分布与变化态势等。均衡形态下的相关因子（如河宽、水深、比降等）和表达来水来沙条件（如流量、含沙量、粒径等）及河床地质条件的特征物理量之间的河相关系，可为河流生态修复工程设计提供基础。

3.4.4 地貌单元调查方法包括自动全能测量仪（Robotic Total Station）、实时动态定位技术（RTK GPS）、陆基激光定位器（Ground-Based LIDAR）、三维激光扫描仪、超声波测深仪、水下回声探测仪等。

3.4.5 在河床底质中，大颗粒（巨砾、中砾、卵石、砂砾等）多被细沙、淤泥或粘土所覆盖，其覆盖程度对于底栖动物、越冬鱼类、鱼类产卵与孵化影响很大。一般用嵌入率反映大颗粒被细沙、淤泥或粘土覆盖状况，可按照<5%、5%~25%、25~50%、50~75%、>75%进行分级。

3.4.6 岸线是水域与陆域交接地带的总称，具有一定长度与宽度的空间区域。岸线功能包括过滤面源污染、防止水土流失、生态廊道与生境、物质生产、景观休闲等。岸线类别包括具有自然特征和生态功能的生态型岸线、工程设施和工业生产使用的生产性岸线，以及可进行游憩休闲、商业文化等日常活动的生活型岸线。

3.4.7 水利水电工程包括水库、堤防、护岸、水闸、水电站、泵站、拦河闸坝等，航道整治工程包括护滩、护底、导堤、清礁、疏浚等，管道工程包括天然气管、输气、输油、输供水管等，交通工程包括桥梁、涵洞、隧道、港口、码头等，取水排水工程包括取水口、排污口等。

3.5 生物状况

3.5.1 需对工程区已实施的栖息地保护及修复措施开展调查，包括过鱼设施、障碍物拆除、河流再自然化、生态调度等技术措施及其实施效果等。

3.5.2 对生物状况宜用生物群落中的物种丰富度和物种均匀度进行生物多样性分析。物种丰富度用来描述生物群落中物种数量的多少，可用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 表示。物种均匀度用来描述群落中不同物种（生物量、盖度或其他指标）分布的均匀程度物种中的个体的相对丰富度或所占比例，可用 Pielou 均匀度指数 (J) 表示。计算公式如下：

$$H' = -\sum (n_i/N) \times \log_2(n_i/N) \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

式中： n_i ——第 i 种个体数； N ——同一样品中个体总数； S ——种类数。

浮游植物包括所有生活在水中以浮游方式生存的微小植物。通常浮游植物是指浮游藻类，而不包括细菌和其他植物。浮游植物能进行光合作用，是河流中主要初级生产者，对河流的营养结构非常重要。浮游植物对人类许多干扰行为较为敏感，如径流调节、生境变更、物种入侵以及由营养盐、金属和除草剂引起的污染，因而常被用来进行河流生态监测与评价。

大型底栖无脊椎动物是指其生活史中全部或大部时间生活在河流底部基质

上的水生无脊椎动物，主要包括扁形动物（涡虫）、环节动物（寡毛类和水蛭）、线形动物（线虫）、软体动物、甲壳动物和各类水生昆虫。大型底栖无脊椎动物是河流生物评价中最常用的生物类群，已被广泛应用于评价人类活动对河流生态系统的干扰和影响。

对鱼类而言，可用相对重要性指数（Index of relative importance，IRI%，见表 1 进行优势种分析。计算公式如下：

$$IRI\% = \left(\frac{(W_i\% + N_i\%) \times F_i\%}{\sum_{i=1}^n (W_i\% + N_i\%) \times F_i\%} \right) \times 100 \tag{3}$$

式中：W_i%——第 i 种在渔获物中的重量百分比；N_i%——第 i 种在渔获物中的尾数百分比；F_i%——采样中第 i 种的日出现率。

表 1 基于相对重要性指数 IRI 值的鱼类优势种分析标准

IRI 值	种类
>500	优势种类
100~500	常见种类
10~100	偶见种类
1~10	少见种类

3.7 河湖生态现状综合评价

3.7.2 河湖生态状况分级系统有三方面的功能，一是对河湖生态现状进行评估；二是辅助识别关键胁迫因子；三是定量确定河湖生态修复目标。河湖生态状况分级系统表分为要素层、指标层和等级层三个层次。生态要素包括生物质量、水文情势、物理化学和河流地貌形态 4 类。生态要素层下设若干生态指标，生态指标的数量，根据具体项目规模和数据可达性确定。生态指标下设 5 个等级，即优、良、中、差、劣。

按照生态状况分级原则，构造生态状况指标赋值矩阵，其步骤如下：①按照上述构建河流生态状况参照系统方法，给“优”等级的各项生态指标赋值。②依据不同类别的生态要素特征，确定赋值准则。③以参照系统的理想标准值为基准，按照与理想标准值的偏离程度（变化率），将各生态指标分 5 个等级。生态指标与理想标准值的比值，是一个无量纲值，以 100 计分，“优”等级记为 100，其他等级依次递减，不同类别生态指标递减程度需符合赋值准则。这样就构造了生态状况指标赋值矩阵。

参照系统是自然河流生态状况，可以近似认为水资源大规模开发前的河流生态状况是近自然状况。建立参照系统需要开展大量的基础工作，包括河流调查、生物调查，收集历史与现状数据资料，在大量数据支持下，按照统计学原理结合专家经验，确定各项指标值。有些指标如水质类指标有相关国家或行业标准，可以直接引用。

表 2 是一个河流生态状况指标赋值矩阵范例。该矩阵中，生态要素包括生

物质量、水文情势、物理化学、河流地貌共 4 类。生态要素层下设 10 项生态指标。其中，生物要素下设丰度和生物量 2 项指标；水文情势要素下设生态基流和水文过程 2 项指标；物理化学要素下设水质、水温和一般状况 3 项指标；地貌形态要素下设连续性、连通性和河流形态 3 项指标。采用矩阵下标表示法构造指标矩阵。表 2 中的 10 项指标分别用 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 j 表示。下标的标注方法如下：规定第一个下标表示要素层，令生物、水文、物理化学、河流地貌等 4 类要素层的下标编号分别为 m 、 n 、 o 、 p 。规定第二个下标表示等级层，令等级层的优、良、中、差、劣的下标编号分别为 1，2，3，4，5。举例：指标 c_{n2} 中的 c 表示生态基流指标，第 1 个下标为 n ，表示属水文要素类；第 2 个下标为 2，表示属于“良”等级。这样指标 c_{n2} 表示水文类要素，生态基流指标，等级为良。

对于生物质量类指标，评价物种可以有多种，包括浮游植物、大型水生植物、鱼类和底栖无脊椎动物等。在这种情况下，要素层下标 m 需要赋值， $m=1,2,3, 4$ 。其中，规定浮游植物 $m=1$ ，大型水生植物 $m=2$ ，鱼类 $m=3$ ，底栖无脊椎动物 $m=4$ 。例如 b_{43} 则表示生物要素类，底栖无脊椎动物，生物量指标，等级为“中”。

表 2 河流生态状况指标赋值矩阵范例

要素层			生物质量		水文情势		物理化学			河流地貌		
要素层编号			m		n		o			p		
指标层			丰度	生物量	生态基流	水文过程	一般状况	水质	水温	连续性	连通性	河流形态
指标			a_m	b_m	c_n	d_n	e_o	f_o	g_o	h_p	i_p	j_p
等级层	优	1	a_{m1}	b_{m1}	c_{n1}	d_{n1}	e_{o1}	f_{o1}	g_{o1}	h_{p1}	i_{p1}	j_{p1}
	良	2	a_{m2}	b_{m2}	c_{n2}	d_{n2}	e_{o2}	f_{o2}	g_{o2}	h_{p2}	i_{p2}	j_{p2}
	中	3	a_{m3}	b_{m3}	c_{n3}	d_{n3}	e_{o3}	f_{o3}	g_{o3}	h_{p3}	i_{p3}	j_{p3}
	差	4	a_{m4}	b_{m4}	c_{n4}	d_{n4}	e_{o4}	f_{o4}	g_{o4}	h_{p4}	i_{p4}	j_{p4}
	劣	5	a_{m5}	b_{m5}	c_{n5}	d_{n5}	e_{o5}	f_{o5}	g_{o5}	h_{p5}	i_{p5}	j_{p5}

4 设计原则

4.1 一般规定

4.1.1 在尊重河湖的自然属性基础上，适当辅助以人工措施，靠生态系统本身的功能，使生态系统功能不断完善，增强生态系统结构对外界干扰的恢复力。可将未大规模开发的自然河湖生态状况作为参照系统，尽可能恢复河湖生态系统的结构、功能和过程，维护河湖生态系统的完整性，提倡自然化，避免渠道化、园林化、商业化等人工化倾向。

生态系统的自组织功能表现为生态系统的自修复能力和系统的可持续性。自组织、自设计的适用性取决于具体条件，包括水量、水质、土壤、地貌、水文特征等生态因子，也取决于生物的种类、密度、生物生产力、群落稳定性等多种因素。运用生态系统自组织、自我恢复原则，并不排除工程措施、生物措施和管理措施的应用。

4.1.2 生态空间是指具有自然属性、以提供生态服务或生态产品为主体功能的国土空间。河湖生态空间是构成生态空间的核心要素和关键组成，主要包括河湖水域空间、岸线空间、蓄滞洪空间以及陆域水源涵养、水土保持等生态空间，是洪水的通道、水资源的载体、生态廊道的重要组成部分，在流域、区域生态安全格局中发挥主骨架的作用。

结合行洪通道、水域及岸线保护、饮用水源保护、生物多样性保护等河湖生态空间保护要求，将河湖生态空间按照禁止开发区、限制开发区进行管控。其中，禁止开发区即生态保护红线区，是河湖生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域，是保障和维护水资源生态安全的底线和生命线。在生态保护红线范围内，严禁不符合主体功能定位的各类开发活动，严禁任意改变用途、擅自占用和改变用地性质等。除生态保护红线以外的其它河湖生态空间均按照限制开发区要求进行管控，通过制定区域准入条件，有效规范空间开发秩序，合理控制开发强度。

河湖生态空间管控的目的是保障河湖生态系统持续地提供生态服务或生态产品，这就需保持适宜的河湖生态空间范围，合理的流量水量条件和良好的水质状况，维护河湖生态系统的空间结构和功能的完整性等。要坚持生态优先，统筹协调经济社会发展和生态保护的关系，以河湖水域、岸线等生态空间为对象，以水资源水环境和水生态承载能力为依据，对河湖生态空间保护、开发利用及涉水各类经济社会活动提出各类管控措施要求，主要包括明确河湖生态空间范围与功能定位、管控类型分区；提出水资源消耗上限、水环境质量底线、生态保护红线等协同管控目标；明确河湖生态空间用途管制、水资源利用管控、水环境质量管控以及综合管控能力建设等。

4.1.3 河湖生态系统包括广义水文系统、生物系统和人造工程设施系统。一条河流的广义水文系统包括从发源地直到河口的上中下游地带的地表水与地下水系统，以及由河流串联起来的湖泊、水塘、沼泽和洪泛区等。广义水文系统又与生物系统交织在一起，形成自然河流生态系统。而人类活动和工程设施作为生境的组成部分，形成对于水域生态系统的有利或不利影响。

河湖生态系统受到胁迫时，需要对于各种胁迫因素之间的相互关系进行综合、整体研究，按照生态系统的整体性、系统性及其内在规律，统筹考虑山水林

田湖草自然生态各要素，合理布局各类生态保护和修复措施，推进整体保护、系统修复、综合治理，增强生态系统循环能力，维护生态平衡。

4.1.5 在河湖生态保护和修复工作中，由于各类自然过程和生态要素都存在较大的不确定性，需加强水生态保护和修复项目的监测和评估，按照适应性管理的方法，不断调整保护和修复策略，以保障河湖生态保护和修复目标的实现。

4.2 总体要求

4.2.1 河流生态保护与修复要着眼于生态系统结构与功能的恢复，重点是改善河湖生态系统结构和功能的完整性。水生态要素包括水文情势、河湖地貌形态、水体物理化学特征及生物组成，各生态要素交互作用，形成了完整的结构并具备一定的生态功能。这些生态要素各具特征和功能，任何生态要素的退化都会影响整个生态系统的健康。仅修复单一的生态要素，往往难以达到修复目标。对于一个具体项目，河湖生态系统的整体修复不等于面面俱到地修复全部生态要素，要结合水生生态现状评估和问题识别，针对重点生态要素采取保护和修复措施。

如条件允许，可采用河湖生态状况分级系统分析确定河湖生态修复的量化目标。在此系统中，将未大规模开发的自然河湖状况作为参照系统，是最佳理想状况；将河湖生态系统严重退化状况作为最坏状况，中间分成若干等级；构造包括水文情势、物理化学、河流地貌形态和生物等不同生态要素及多个相应生态指标的分级指标体系，每个指标可划分优、良、中、差、劣等等级；将生态系统现状与参照系统进行对比分析，明确生态现状分项等级，分析与参照系统的偏离程度；分析修复可行性和约束条件，合理确定保护和修复的生态指标及对应等级。

4.2.2 实际规划设计工作中，河流廊道宽度可采用对应某一洪水频率的河流滩区范围。

4.2.3 突出目标定位和问题导向，针对性提出相应保护和修复措施。对健康状况良好以及生态保护红线涉及的河段，重点采取生态保护和红线管控为主的措施；对污染严重的河段，重点采取污染控制和水质调控等措施；对生态水量不足的河段，重点采取生态调度、取水限制及生态补水等措施；对水域岸线侵占严重、采砂、堤防建设等人类活动影响明显的河湖，可结合防洪、供水、生态及景观保护等要求，重点采取河湖自然形态保护和修复措施，必要时应提出合理避让、退出搬迁等对策；对重要水生生物及栖息地所在河段，结合水生生物生态习性及其“三场”分布等，重点采取水生生物资源保护、栖息地保护与修复措施；对超载严重、受损严重且不可恢复的河湖生态系统，按照系统治理的要求，采取综合治理措施。

5 河湖生态流量保障

5.1 一般规定

5.1.1 由于人类对水资源的开发利用与调控,改变了天然水文情势,引起河湖生态系统结构和功能发生一系列变化,导致水生态系统退化。在河湖开发利用的背景下,河湖水文过程难以重现天然过程,针对河湖生态保护和修复目标,确定需要维持的河湖基本水文条件以及水文过程中的关键时段,特别是枯水期流量和水量控制要求,为管控水资源开发利用强度、优化河湖水资源调度管理等奠定基础。

河湖生态流量或生态水位控制断面选取原则包括:①相关规划、水量分配方案中已明确生态流量要求的控制断面及把口断面(入江控制、入海控制、尾间控制);②水资源量变化显著,下泄流量对下游生态影响较大的断面;③涉及重要鱼类生境、重要湿地等重要生态敏感区的断面;④控制性枢纽及大型引调水工程断面等。为便于监控和调查评估,主要控制断面选择应尽可能与水文测站、水利水电工程断面等一致。

按照河湖生态系统整体性和系统性保护的要求,河湖生态流量管控目标并非单一的流量或水量目标,而是包括生态基流、敏感生态流量、生态水位等一种或多种组分,明确目标值、过程和保证率等要求的生态流量指标体系。

针对不同类型河湖,生态基流、生态水位、生态水量可全年为一个常数,也可分年内不同水期(汛期、非汛期、冰冻期等)或不同时段确定不同的目标值。敏感生态流量是指河流湿地及河谷林草、湖泊、河口和重要水生生物繁殖等敏感生态保护对象的生态需水要求,主要是由敏感期、峰值、持续时间、出现频率、变化率等决定的一个或多个脉冲(或洪水)过程等。

在满足城乡居民生活用水的前提下,优先考虑生态流量保障,合理确定生态流量设计保证率要求。一般情况下,河流生态基流、湖泊湿地最低生态水位不应被破坏,原则上按 100%控制。敏感生态流量保证率可根据敏感保护对象的功能要求,依据水文变化规律和生态特点,结合脉冲(洪水)频率要求分析确定。

5.1.2 河流生态流量核算方法包括水文学方法、水力学方法、栖息地模拟法、综合法、水文变化的生态限度法等。湖泊最低生态水位核算方法包括不同频率枯水月平均值法、生物空间法等。

水文变化的生态限度法(Ecological Limits of Hydrological Alteration, ELOHA)主要是针对因从河流中大规模取水以及水库径流调节而改变了自然水文情势的河流。通过应用水文变化的生态限度法,建立特定河流水文情势变化与生态响应定量关系。这种关系用于河流生态管理的两个方面:一方面,对于已经开发的河流,确定生态流量标准,进而制定取水标准和改善水库调度方案,达到保护水生态系统的目的;另一方面,对规划中的大坝项目或其他水资源开发项目,预测大坝建设和河流开发后的生态响应,评估大坝及河流开发的生态影响,进而优化大坝、水库的规模以及梯级开发总体布置方案。主要步骤包括:(1)水文建模。定义未被干扰的水文状况为参照系统,或称水文基线。应用水文情势 5 组分理论,分别计算参照系统水文系列和开发后水文序列的水文参数频率曲线。(2)河流分类。按照水文情势 5 组分数据,结合河流地貌特征,识别河流类型(如雨洪补给河流、融雪补给河流、地下水补给河流等)。对于大中型河流,河流应以河段为单位进行分类,区分河流类型并沿着水流流向设立河段节点。对于梯级开

发河流，每座大坝下泄方式各不相同，所以应以大坝为节点，分析河段的水文情势变化。（3）水文情势变化分析。对于同一类型河流，选择能够基本反映水文特征的一、两种水文组分参数（如流量、水位、时机、延时等），将河流开发前后的水文组分频率曲线进行对照，分析每个节点开发前后水文情势变化，计算每个节点现状水文条件与基准水文条件的偏离程度。（4）建立水文情势变化-生态响应关系。根据每种河流类型水文-生态关系特征，选择对应的有代表性的若干生态指标（如鱼类、无脊椎动物、河滨带植被等），这些生态指标能够大体反映河流的健康状况。通过水文、水质、生物、地貌等相关资料收集，生物调查和监测以及专家知识，汇总成水文、生态数据库。分析每个节点的生态数据，解释水文情势变化引发的生态响应关系，通过统计学回归分析等手段，拟合水文-生物函数关系和曲线。（5）生态风险评估和决策。通过科学家、决策者和管理者、水资源用户、社会公众团体等各利益相关者共同协商，进行生态风险评估，可采用的方法是风险基准(risk benchmark)方法或称临界风险水平(critical risk level)。所谓风险基准，即现状水文情势与参照水文情势的允许偏差程度。允许偏差程度越高，则生态风险越大。各利益相关者需要评估针对有价值的生态资产或生态服务（如自然风景、生物多样性、渔场等），认定何种程度的生态风险是可以接受的，即何种程度的生态退化是可以接受的。根据水文-生态关系曲线，就可以确定生态流量标准，其可以是具体数值，也可以是一个数值范围。（6）生态流量标准的执行方式，包括制定取水限制政策、改善水库调度方案、制定水资源配置规划等。在执行过程中，应持续进行生态调查和监测，分析各个节点的水文和生态监测数据，用于验证或调整水文-生态关系，特别需要验证执行了生态流量标准以后，生态状况是否达到预期目标。如果水文-生态关系进行了调整，就需要进一步修正生态流量标准，如此多次反复进行，使生态流量标准逐步完善，形成适应性管理过程。

对于数据无法获取区域，必要时需参照类似区域采取合理方法，并进行专家论证。

5.1.1.3 河湖生态流量保障在于实现淡水资源的社会经济价值和生态价值间的平衡。在进行水资源综合配置时，将生态用水纳入流域水资源配置和管理，统筹生活、生产和生态用水，在首先满足城乡居民生活用水的前提下，按照生态优先的原则合理确定河湖生态流量目标。

结合不同流域区域、不同类型河湖的分布状况、水文气候特征、水资源禀赋条件、开发利用状况及生态保护要求等，在综合分析基础上分区分类合理确定主要控制断面的生态流量及过程要求。

对南方常年有水河流，以加强流域整体生态保护、维护河湖水生生态系统水文情势为目标，从源头、上游、中游、下游及河口，系统配置生态水量，明确生态流量及敏感生态需水过程等。对北方季节性河流，分山区河流、平原河流及河口分别配置生态水量，对水体连通河段，保障一定的生态基流；对非水体连通河段，可从水质净化、维持一定水面及植被用水量等，配置必要的生态水量。

对于敏感生态需水及过程要求，可结合现场查勘、典型断面分析合理确定。其中，对湖泊生态需水量，充分考虑保障湖泊水体基本水动力条件和自净能力，采用湖泊最低或适宜水位对应的蓄水量，以满足湖泊水生生态系统用水要求。对湿地最小生态需水量，以维持水生动植物生存条件的最低水位和水面考虑，计入蒸发渗漏损失确定。对河口，以河口湿地、保护鱼类需水及河口压咸等为重点确定，维持河口生态系统良性发展。对河谷林草及鱼类等水生生物栖息地，主要通过塑

造人工洪水或流量脉冲等，满足敏感生态流量过程要求。

充分利用已有工作基础，收集整理流域综合规划、水资源保护规划、水量分配方案、建设项目环评及取水许可批复文件等成果，加强生态流量目标的协调性和可达性分析。结合河湖生态流量保障目标、存在问题和成因分析，针对性提出保障措施和要求。对评价为满足、基本满足的断面，主要采取加强水资源及水利工程调度管理、落实保障责任、强化生态流量监管等措施。对评价为不满足的控制断面，主要通过生态流量泄放设施补建或改造、水利水电工程调度管理优化、严格取水管控、河湖水系连通及生态补水、生态流量监管和责任考核、生态补偿等措施；对涉及水资源配置优化调整、生态补水等措施要求的，依据相关规划，结合水源和工程实施条件，合理安排近远期建设任务。

5.2 生态水量优化配置

5.2.3 对我国北方、西北等水资源短缺地区，结合流域区域水资源调配工程实施情况及水源条件，以深挖节水潜力、充分利用雨水资源为前提，在科学论证基础上提出引调水或生态补水工程措施，但要注意严控无序调水和人造水景工程，防止以恢复生态为由，过度追求大水面、大景观，造成水源区生态破坏和受水区用水浪费。

对于生态用水遭受严重挤占及周边具备引水条件的，在充分论证生态补水工程的经济合理性和环境可行性基础上，提出生态补水水量配置方案，明确补水水源、补水线路、补水规模、补水时段要求等。

按照“先节水后调水，先治污后通水，先环保后用水”的原则，合理规划建设跨流域、跨区域引调水工程，对水资源在经济社会系统和生态环境系统之间、不同流域和区域之间进行合理调配，逐步退减被挤占的河道内生态环境用水和超采的地下水。

5.3 生态流量泄放

5.3.1 结合不同类型的工程实施条件，合理确定生态流量泄放方式，主要生态流量泄放方式包括以下几种：

（1）闸门泄流。主要利用现有低闸闸门，如泄洪闸、冲砂闸等泄流。该泄流方式的优点在于可以充分利用现有构筑物，不会因新增泄水建筑而影响坝体结构。但闸门设计泄流量很大，通过控制闸门开度难以精确调节下泄流量，无法满足中小型河流生态泄水要求，且闸门长期小开度泄流产生的振动可能使金属结构疲劳，影响工程安全。

（2）坝体埋管。根据泄流能力要求，在坝体埋设特定尺寸的专用水管下泄生态流量。该泄流方式通常用于小流量下泄，但对于堆石坝等坝型，由于坝体纵向很长，坝体埋管极易发生堵塞，且埋管贯穿坝体可能对大坝的防渗、抗震的安全性产生影响。

（3）引水洞泄流。对于无法采用闸门和埋管进行泄流的堆石坝等坝型，可在发电引水隧洞的适合位置布设泄流系统，但对地形、地质条件有较高要求。

（4）生态机组。根据水电工程的实际情况，下游无反调节电站的调峰电站可在坝体或引水系统上设置生态流量放水管，在电站不运行时，通过另设的放水管往下游泄放生态流量；出现减（脱）水河段的引水电站，可以通过开启枢纽闸门或在坝体上设置生态流量放水管下泄生态流量，保证减（脱）水河段不断流。

在满足发电水头、流量要求和符合经济评价的情况下，可在生态流量放水管后设置小机组，通过发电放流。

5.3.3 考虑工程建设及运行条件，分不同类型提出生态流量泄放设施措施要求，主要包括以下几种类型：

（1）对建设年代较早但有条件进行改造的工程，可结合水库或电站除险加固、电站增效扩容改造以及其它技术改造，充分利用已有泄水构筑物、坝后电站等进行生态化改造或增设专用生态流量泄放设施等。比如，为保证引水式电站脱水河段下泄生态流量及利于鱼类洄游，可对引水式电站进行鱼坡式溢流坝段生态改建，其技术要点如下：①确定引水式电站闸坝生态改建的目标是保障厂坝间河道生态流量需求及保障鱼类和底栖动物能够上溯或降河运动。②核算生态流量的简易方法可采用 Tennant 法，带有研究性质的项目可采用 ELOHA 方法。③引水式电站改建工程，需保留拦河闸坝大部分，以继续发挥挡水和泄洪功能。只需改造部分坝段，用于下泄水流以保证环境流量。改建坝段坝顶高程根据水位-流量关系曲线和环境流量确定。改建的溢流坝段可以设置控制闸门，小型堰坝也可以不设控制闸门，允许自然溢流。④改建的溢流坝段按鱼坡设计。鱼坡是为鱼类洄游专门设计的一种鱼道形式，是具有粗糙表面的缓坡。鱼坡能满足鱼类溯河或降河游泳需求，也适合底栖动物通过。⑤将鱼坡结构整体嵌入堰坝中，构成组合式结构称为“鱼坡式溢流坝段”。鱼坡式溢流坝段具有双重功能，既可以满足下泄环境水流的要求，也可以解决鱼类洄游问题。⑥改建后的闸坝溢流坝段常年泄水，满足环境流量要求。同时，鱼类和底栖动物可以通过鱼坡上溯或降河运动。在汛期，洪水通过保留坝段泄洪，同时调节鱼坡闸门控制下泄流量以防止冲毁鱼坡。

（2）对技术改造或工程拆除难度大、成本过高的工程，可提出采取限制工程部分功能的措施，在枯水期、敏感期等生态流量保障要求高的时段限制发电或引水，实施生态调度等措施。

（3）对建设年代久远、缺乏生态流量泄放设施且对河流生态系统负面影响大，造成河段减水、脱水甚至干涸的中小型水利水电工程，提出逐步清退并开展生态修复等措施。

5.4 生态流量调度

5.4.1 生态流量调度是河流生态修复的重要措施之一，是以满足河湖生态流量为目的，进而保护与修复水库及闸坝下游河流廊道以及河谷林草、河漫滩、沿江湖泊及河口、鱼类栖息地等生态敏感区的水利水电工程调度模式。在原有防洪、发电、供水、灌溉、航运等综合利用调度基础上，增加生态流量调度要求后，水利水电工程原有的综合利用功能可能受到一定程度的影响。一般可根据水库的综合利用功能、调节性能和特征水位等，在生态流量范围内合理选择综合效益最优的调度方案。

5.4.2 以保障防洪安全和生态流量为约束条件，按照兴利服从防洪、区域服从流域、电调服从水调的原则，制定水利枢纽工程调度运行方案。兼顾生态保护的水库调度方式是指在不显著影响水库防洪、发电、供水、灌溉等社会经济效益的前提下，改善水库调度模式，保护与修复水库及大坝下游河流以及河口的生态系统。这种调度方式目的在于协调水库的社会经济效益与生态效益，追求综合效益的最优化。

兼顾生态保护的水库调度目标可分为以下 6 种：保证下游最低环境流量、改善水库或下游水质、调整水沙输移过程、保护水生生物、恢复岸边植被、维护河

流生态系统完整性。近年来,随着自然水文情势、自然水流范式、河流健康评估等理论和方法的提出,人们逐渐认识到,单一生态目标的调度方式调整难以达到维护河流健康的根本目的。究其原因,从自然水文情势的理论看,自然水文过程的高流量、低流量和洪水脉冲过程都具有特定的生态作用;从河流健康的内涵看,只有水文、水质、河流地貌、水生生物等生态要素都满足一定的要求,才称之为健康河流。因此,改进水库调度方式的指导理念逐渐转变为保护本地生物多样性和河流生态系统完整性。所制定的生态流量方案涵盖了自然水文过程的高流量、低流量和洪水脉冲过程的流量、频率、发生时间、持续时间和变化率的变化范围。基于适应性管理的方法,开展改进水库调度、满足生态流量需求的现场试验,监测下游生态响应,进行反馈分析,进而修正调度方案。如此反复进行,通过多年的调度试验,逐渐完善调度方案。现在正在进行的一些改进水库调度的项目正朝着这个方向努力,如美国的可持续河流项目(Sustainable Rivers Project)和澳大利亚的恢复墨累河活力(The Living Murray)项目。

在制定兼顾生态保护的水库调度方案时,可以按照河流内流量增量法(IFIM)、变化幅度法(RVA)和水文变化的生态限度法(ELOHA)等方法,确定特定时段的生态流过程线。用于水库调度的水流过程线通常在一定的区间范围内变动,需要根据当年的水库和下游水文状况,综合考虑水库的防洪、发电、供水、旅游等效益,在生态水流范围内选择综合效益最优的调度方案。兼顾生态保护的水库调度一般不会明显降低水库原有的社会经济效益,因此它本质上是一种添加了生态保护目标的水库调度方式的再优化。当然,由于添加了生态保护目标,水库原有的防洪、发电、航运等效益可能会受到一定程度的影响。将生态保护目标纳入现行水库优化调度模型中有以下几种方式:

- 1.以生态流量需求作为调度模型的约束条件,简称水文指标约束型水库优化调度模型。这是在现行优化调度模型中加入生态保护目标的最常用做法。胡和平等(2008)提出的基于生态流量过程线的水库生态调度方法中,将每月生态流量的上、下限组成的生态流量过程线作为调度模型的约束条件,求解兼顾生态保护的水库下泄流量过程。

- 2.以生态指标的变化范围作为调度模型的约束条件,简称生态指标约束型水库优化调度模型。这种调度模型适用于对生态目标有“强制”要求时,譬如重点水域的水质要求。Hayes等(1998)在研究通过大坝联合调度增加坎伯兰河的溶解氧浓度时,以溶解氧不小于 5mg/L 作为水库调度模型的约束条件。为了避免巴西三座水库发生水体富营养化,Valle等(2009)以叶绿素浓度不超过 30mg/L 作为水库调度模型的约束条件。

- 3.将水库调度的生态效益和社会效益货币化,以水库调度的综合效益最大化作为调度模型唯一的目标函数,简称综合效益最优型水库优化调度模型。建立这类模型的难点在于合理评估河流生态系统服务功能的价值,如水质净化、渔业生产、娱乐文化服务等,并量化水流变化与这些服务价值的响应关系。Harpman等(1992)提出了一套量化“水流变化~鱼类栖息地变化~鱼类资源响应~经济效益变化”的方法。Khan等(2009)建立了水库淤积与经济损失之间的关系,以水库灌溉、发电、清淤和防洪等综合经济效益最优化建立了调度模型。

以上三种方式中,水文指标约束型水库优化调度模型最为常用。为了获取最优的兼顾生态保护的水库调度方案,通常需要采用一些优化算法求解单目标或多目标水库调度模型。对于多目标水库调度模型,通常采用权重法,即根据不同调度目标的重要程度确定目标函数的权重向量,将多目标优化问题简化为单目标优

化问题求解。水库调度模型常采用的优化算法如表 3 所示。

表 3 水库优化调度模型的常用优化算法

优化算法	优点	缺点	参考文献
线性规划法	不需要初始解； 结果收敛于全局最优解；	需对非线性目标函数和约束条件进行线性化处理	Mannos, 1955
非线性规划法	能处理不可分目标函数和非线性约束	优化速度比较慢	Chu <i>et al.</i> , 1978
遗传算法	具有并行计算和全局最优搜索能力； 适宜求解复杂的多维非线性优化问题；在水库优化调度中应用广泛；	有可能早熟或陷入局部最优解	Holland, 1975； 马光文等 1997； 王少波等， 2006
蚁群算法	通用性强； 具有并行搜索能力；	计算速度一般	Huang, 2001； 徐刚等，2005
粒子群优化算法	简单易于实现；计算效率高； 并行处理能力强；	易陷入局部最优解	李崇浩等， 2006； 万芳等，2010

4. 计算生态保护目标的生态流量需求。根据上一步得出的水文改变与生态响应关系，结合既定的生态保护目标，便可大致计算出生态保护目标的生态流量需求。它可以是低流量过程、高流量过程和洪水脉冲过程中的一种或几种环境水流组分，也可以是某一水文事件的流量、频率、发生时间、持续时间和变化率等参数的变化范围。假如需要保护的生态目标与库区的水流、水质状况有关，那么生态流量需求可能还包括库水位的范围、流量变化率及变化幅度等。为了满足生态保护目标的生态流量需求，有时会对水库的泄流口、分层取水装置的运用等提出更详细的要求。

5.4.3 针对年调节和多年调节大型水库或水电站，可加强水库生态流量调度的适应性管理，同步开展水文、生态监测，不断修正完善水库调度方案，提高生态流量保障水平。对枯水期河流水文情势影响大的水电站，可改变发电调度方式，推动季节性限制或临时限制运行。

5.4.4 可通过情景模拟法拟定联合生态调度方案。以某江下游上、下两个电站联合生态调度为例，说明以鱼类保护为重点的联合生态调度方案的拟定过程：

（1）结合梯级电站调度运行对水生生态影响特性和某江下游水生生态特点，明确本流域生态调度重点为水量、水文过程、水温、水质调度。其次，采用层次分析法，筛选出该江段主要水生生态保护目标为梯级电站库尾河段生态流量、库区水质，下电站以下河段生态流量、鱼类产卵场、重要保护鱼类繁殖期流量、水文过程和水温需求等；分产粘沉性卵鱼类和产漂流性卵鱼类，筛选出主要典型研究鱼类，以其长系列生态规律观测资料为基础开展鱼类生态需求研究。

（2）通过长系列监测和观测资料统计分析，掌握生态保护目标的生态需求及规律，采用栖息地模拟法研究出下游典型鱼类产卵场鱼类产卵期流量及变化适宜区间；根据梯级电站现有调度方案水生生态影响研究结论，以生态保护目标

需求为约束条件进行生态符合性研究，明确下电站下泄的生态流量满足下游基本生态需求，电站调度运行对水文过程和水温的改变会在一定程度上影响下游鱼类产卵繁殖，可通过 5-6 月份数次生态调度进行改善。

（3） 以上、下电站现有调度规程为基础，结合近两年来试运行数据，制订两梯级电站联合运行生态调度方案，提出调度方案的实现性选择并进行经济损益分析；提出涵盖生态调度启动前后时期各调度因子和响应因子的调度监测方案；针对生态调度的流量和时间区间进行优化组合，制订上、下梯级联合运行调度试验方案、监测及效果评估方案等。

6 水质保护与改善

6.1 一般规定

6.1.1 进行水域纳污能力分析或制定污染物入河湖量控制方案时，控制指标一般包括化学需氧量或高锰酸盐指数、氨氮、溶解氧等，湖泊和水库可增加总磷、总氮、叶绿素等富营养化指标，部分水域需考虑特征污染物的控制。

6.1.2 需遵循流域水文水力过程、水环境过程与水生态过程基本规律，连接源头控制、过程削减和末端治理三个关键环节，统筹流域山水林田湖草生态要素，考虑河湖水系自然-社会高度耦合特点，构建形成全覆盖、全过程、全要素，以及问题可定位定时识别、措施可落地有效、效果可定量预测的水质保护与改善措施体系。

6.2 入河湖排污口整治

6.2.1 涉及多个县级行政区的水域，为便于考核、落实，需按县级行政区分解重点水污染物入河湖总量及排放总量；根据实际需要也可分解到乡镇一级行政区。迁建的入河湖排污口需另行编制入河排污口设置论证报告书，履行相关审查、审批程序后实施。排污口按照来源可分为工业废水、生活污水、混合废污水、雨水型等不同类别。

6.2.2 排污口整治要求包括：

（1）对于禁止设置排污口的水域，排污口整治要重点考虑污水集中入管网，并与城市的污水截流系统相协调；截污导流可采取将入河排污口延伸至下游水功能区，或延伸至下游与其它入河湖排污口归并等形式；对于无法实施集中入管网或截污导流的入河湖排污口，如果具备合适的条件，可以考虑调整排放，调整排放的水域需符合水功能区管理的要求。

（2）对于远离城市的禁止设置入河湖排污口水域，由于不具备污水入管网的条件，整治方案应重点考虑污水处理后回用、调整（改道）、截污导流等措施。污水经处理后回用包括厂内循环回用和厂外回用两个部分。对于工业污水处理设施产生的达标尾水主要考虑企业内部循环回用；对于城镇污水处理厂处理达标的尾水主要考虑深度处理后的厂外中水回用。提出中水回用治理措施的工程，需明确回用对象。对于未按有关要求建设中水处理回用系统、中水回用率达不到要求的城市区域，需提出包括限制新设入河湖排污口等限制措施。

6.2.3 入河湖前自然生态净化工程主要包括跌水复氧系统、生态沟渠、稳定塘和人工湿地等类型以及多种类型的组合等。

6.3 面源与内源治理

6.3.1 面源污染根据发生区域的不同可分为农业农村面源污染、城市面源污染、矿山面源污染和大气沉降面源污染。其中农业农村面源污染和城市面源污染较为突出。农业农村面源污染的污染源发生在农田、菜地、森林和村庄等区域，污染物包括来自农田的氮、磷和农药，农村生活污水、畜禽养殖废水、土壤流失带来的泥沙、农村生活垃圾等；城市面源污染是指在降水的条件下特别是在降雨初期，

雨水冲刷城市地面，污染径流通过排水系统的传输，使受纳水体水质污染，汛期时容易同时存在污水溢流现象。

6.3.3 过程削减技术指在污染物向水体的迁移过程中，通过物理、化学、生物作用以及工程方法对污染物进行拦截阻断和净化，延长其在陆域的停留时间，最大化减少其进入水体的污染物质。

生态沟渠是在保证输水安全的前提下，在排水沟内通过植草、铺设过滤层，以及设置透水坝、拦截坝等辅助措施，形成具有较高水质净化能力的排水沟渠系统。

土壤渗滤技术通过农田、林地、草地、苇地等土壤—微生物—植物系统的过滤、物理和化学吸附、离子交换、生物氧化和植物吸收等综合作用，固定与降解污水中的污染物，实现废水资源化与无害化。包括慢速渗滤系统、快速渗滤系统、地表漫流系统和地下渗滤系统等。

前置库是利用水库存在的从上游到下游水质浓度变化的特点，在水库末端修建一个或多个子库与主库相连，通过延长水力停留时间，促进水中泥沙及营养盐的沉降，同时利用子库中大型水生植物、藻类等进一步吸收、吸附、拦截营养盐，从而降低进入下一级子库或主库水中的营养盐含量，减缓富营养化过程，改善水质。

滨水缓冲带是在河岸两边种植乔、灌、草等多种植被类型所形成的水陆之间的缓冲区域，可防止地表径流、废水、地下径流所带来的有机质、沉积物、杀虫剂及其它污染物进入河湖系统。

小微水体修复是根据自然地形地貌和水文条件，由水-土-植-微共同形成的多功能自然型复合系统，具有洪水蓄滞、水质净化、景观休闲等多种功能，包括岸坡式、坑塘式、河口式等不同类型。雨水净化技术主要包括下凹式绿地、植草沟、透水铺装、雨水涵养生态池等类型。主要利用城市河湖岸边有限空间过滤净化进入水体的径流污染物，可根据当地实际情况单独使用或几种技术配合使用。

6.3.4 生态清淤技术是指采取工程措施对水体中的污染底泥进行疏挖，以减少底泥中污染物向水体释放，为水生态系统的恢复创造条件，是一种重污染底泥的异位修复技术。底泥生态清淤是利用专用清淤设备，清除河道湖泊水库的污染底泥，并且通过管道将底泥输送到堆料场进行安全处置。与传统意义上以增加水体容积为目的的工程疏浚不同，生态清淤技术的目标是以污染底泥有效去除和水质改善，促进水体生态修复，在技术上要求精确清除严重污染的底泥层。生态清淤技术包括底泥调查、清淤范围与深度确定等。应通过底泥调查掌握污染底泥的沉积特征、分布规律、理化性质，主要包含水下地形测量、底泥勘探及淤积量计算及底泥污染状况调查等。清淤范围的确定方法包括聚类分析法、层次分析法、经验法等。深度不仅决定着工程量和工程规模，而且直接影响效果。过浅达不到有效去除污染物质的目的，而过深又会破坏性地改变湖底形态，影响底栖生态环境和清淤后的生态修复。清淤深度确定方法包括背景值比较法、拐点法、底泥分层释放法、生态风险系数法及经验值法等。

(1) 底泥清淤方式以机械施工为主，包括干挖清淤和带水清淤两大类。干挖清淤主要采用推土机和刮泥机等设备，带水清淤主要有水力冲挖、抓斗式、泵吸式、普通绞吸式、斗轮式等。清淤方式一般按下列方法选择：

① 干挖清淤方式需具备挖掘机工作的操作条件，清出淤泥可通过卡车外运、就近临时存放或者使用挤压式泥浆泵输送至存放点；清淤方式彻底，技术要求不高，清出的淤泥含水率低，便于后续处理。

② 水力冲挖清淤需要在清淤工程附近具备贮存因水力冲挖机产生大量泥浆的低洼区或集浆池。其机具简单，输送方便，施工成本低的优点，但形成的泥浆浓度低，增加了后续处理难度，施工环境相对恶劣。

③ 抓斗式清淤适用于开挖泥层厚度大、施工区域内障碍物多的中、小型河道，多用于扩大河道行洪断面的清淤工程；其施工灵活机动，受天气和河道性质影响较小，但淤泥清除效率不高。

④ 泵吸式清淤的装备相对简单，可以配备小中型的船只和设备，适合进入小型河道施工；清出泥浆水分含量较高，易发生吸泥口堵塞。

⑤ 普通绞吸式清淤适用于泥层厚度大的中、大型河道清淤。集挖、运、吹于一体，实行全封闭管道输泥，不会产生泥浆散落或泄漏；施工不会影响河道通航，不受天气影响，可控制施工精度；会出现底泥中污染物的扩散和回淤现象，泥浆浓度偏低，清除率可在 70% 左右。

⑥ 斗轮式清淤比较适合开挖泥层厚、工程量大的中、大型河道、湖泊和水库，是工程清淤常用的方法。施工不会对河道通航产生影响，不受天气影响，且施工精度较高，但易发生污染物泄漏、回淤及水体二次污染等问题。

(2) 淤泥处置包括以下几种方法：

① 堆场处理。堆场处理法是指将淤泥清淤出来后，输送到指定的淤泥堆场进行处理。堆场表层处理技术是利用淤泥堆场原位固化处理技术，人为的在淤泥堆场表面快速形成一层具有一定强度和刚度、满足小型机械施工要求的人工硬壳层，可进行排水板铺设和堆载施工，便于进一步的处理；设计主要考虑后续施工的要求，结合下部淤泥的性质，通过试验和模拟确定硬壳层的强度参数和设计厚度。堆场周转使用技术是指通过技术措施将堆场中的淤泥快速处理，清空以后重新吹淤使用，如此反复达到堆场循环利用的目的；设计主要考虑需要处理的淤泥总量、堆场的容量、周转周期和周转次数等。

② 资源化利用。制砖瓦、陶粒以及固化、干化、土壤化等；农村地区无重金属污染、氮磷含量丰富的淤泥进行还田，或将其于洼地堆放后作为农用地利用；自然干化后作为公园、绿地、市政建筑用地的土料；用于湖滨带、河滨带的基底构建，河、湖堤防内的洼地抬高，

③ 污染淤泥的钝化处理技术：淤泥中含有某些特殊污染物不易去除，进行资源化利用会造成二次污染时，添加钝化稳定材料对污染成分进行物理包裹稳定，降低浸出风险，满足后续资源化利用的要求。

在自然保护区、水产种质保护区、饮用水源保护区等敏感水域进行底泥清淤时要尽可能避免对水体环境产生影响，必要时要进行生态风险分析。底泥原位处理是不将底泥疏浚出来，而是直接在水下对底泥进行覆盖处理或者是排干上覆水体然后进行脱水、固化或物理淋洗处理。围网养殖污染严重的水域，应实施围网养殖清理工程。

6.4 河湖水体水质维护

6.4.1 河湖水体水质维护技术主要包括：

(1) 人工曝气增氧技术包括鼓风式曝气、机械式曝气、移动式曝气及水利设施曝气等。曝气方式可根据景观水体的污染程度、主体功能、尺寸进行选择。曝气河段有航运和景观功能时，可采用鼓风式曝气，无航运功能时可采取机械式曝气；可根据河段需要采取移动式曝气方式，采用可以快速移动的曝气船设备，

其优点是可以根据曝气河段的水质变化和航运要求，灵活调整曝气强度和曝气位置，使曝气过程更为经济；也可利用小型闸门、跌水、瀑布水景等具有高差的水利设施进行曝气增氧。

(2) 生物浮床技术所采用浮体装置，应满足浮力大、抗冲刷、承载力强、耐水性好、不易老化变形、能固定植物根系且能保证植物生长所需水分养分等要求。生物浮床结构主要包括框体、床体、基质和植物。浮床基质用于固定植物植株，同时要保证植物根系生长所需的水分、氧气条件及能作为肥料载体。生物浮床内植物可根据建设区域的气候、水质条件进行选择，比如美人蕉、芦苇、荻、水稻、香根草、香蒲、菖蒲等。

(3) 河道生物接触氧化技术通过在主河道或支流内设置具有多孔性、高比表面积的载体材料，利用载体上形成的生物膜对水体中的污染物进行降解转化，可起到改善水体生态系统状况、提高水体自净能力的作用。该技术应用时不应影响河道行洪、航运等原有功能，并宜选用天然材料。

(4) 水系连通活水循环技术是指通过水网内水闸、水泵、扬水站、堰坝等多个水利工程的联合调度，提高水系连通程度，改善水网内水体的循环条件，提高缓滞型水体流动性，满足不同河段的防洪安全、水质改善、栖息地提供、景观休闲等多目标需求。

(5) 自然生物处理技术主要包括稳定塘、雨水利用塘、生物景观塘等类型，可根据现场空间情况与主河道连通使用或单独使用，具体说明如下：

① 稳定塘通常是结合自然地形地貌条件，将土地进行适当人工修整，将其建成池塘，并合理设置围堤和防渗层，然后依靠塘内生长的微生物来净化水体。影响稳定塘净化效果的因素包括水体类型、水力停留时间、蒸发量和降雨量、有机负荷、水温、水位和塘的控制性边界条件（包括工程性边界条件，如闸、坝、涵洞等，以及非工程性边界条件，如泄洪、排涝等运行方式）等。包括好氧塘、兼性塘、厌氧塘和曝气塘等类型。塘址的选择应符合建设区域防洪标准的规定，塘址的土质渗透系数宜小于 0.2 m/d 。塘内可种植浮水植物、挺水植物、沉水植物或多种植物的组合，浮水植物包括浮萍、槐叶萍等，挺水植物包括水葱、芦苇等，沉水植物包括马来眼子菜、叶状眼子菜等。

② 雨水利用塘通过滞留、沉淀、过滤和生物作用等方式，达到削减洪峰和径流污染控制目的，应符合雨水径流污染控制、城市防洪排涝以及生态环境改善等要求。雨水利用塘的进水管不宜采用淹没进水，当单个进水管进水量大于总设计处理水量的10%时，宜设置预沉淀池。雨水利用塘出口处应设置防冲设施。雨水利用塘内可种植浮水植物、挺水植物、沉水植物或多种植物的组合。雨水利用塘应定期维护，包括清除杂草杂物、异味消除、蚊虫杀灭、结构安全性维护、淤泥清理等。

③ 生物景观塘内可种植浮水植物、挺水植物、沉水植物或多种植物的组合。选种的水生植物应具有良好的净水效果、较强的耐污能力及较高的景观价值。塘水面应分散地留出20%~30%的水面。设计中应考虑水生植物的收集、利用和处置。

(6) 除藻技术包括机械除藻、生物控藻及絮凝除藻技术等。

① 机械除藻。通过机械或人工打捞直接去除水华蓝藻，在水华暴发前期加大机械除藻量，对控制后期水华暴发作用更为明显。

② 生物控藻。鱼类控藻技术：属于非经典生物操纵技术，它是应用滤食性鱼类（如鲢、鳙）对于蓝藻的直接摄食来控制蓝藻，大幅降低水体中的藻毒素含量，

达到降低叶绿素浓度和提高透明度的目的。贝类控藻技术：大型双壳贝类是自然水体中重要的底栖动物。利用贝类强大的滤水滤食功能，可以改善水质和防止赤潮和水华发生。贝类控藻技术是利用当地的贝、蚬等底栖动物，在湖区进行规模化养殖，配合其他除藻措施，能够有效去除蓝藻，使悬浮物浓度和叶绿素a浓度都有所下降，达到提高透明度、保护水生高等植物的目的。

③絮凝除藻。絮凝除藻技术是指向湖泊水体中投放粘土，通过絮凝作用沉降水华。这种技术一般在水华大面积暴发湖泊区域作为应急措施应用。粘土由多种矿物质及杂质组成，具有来源充足，安全性高，施工方便等优点。在实际应用中需注意粘土投放量过大、粘土容易在水中泛起造成细颗粒悬浮等问题。

（7）生态沉床技术

生态沉床系统包括箱体、填料、人工水草、沉水植物等组成部分，根据实际情况采用模块化组织形式，充分利用当地现有的砂石块和土壤等资源，可拆卸，方便管理和回收利用。箱体模块改变水流状态，形成部分水流缓滞区，为生物提供了适宜的栖息带。填料为沉水植物提供了营养物质和良好的底质环境，增加沉水植物种植成活率和抵抗外界环境的能力，并可根据需要调整沉水植物的布置密度及增设人工水草。填料层、人工水草-沉水植物共植共生层可吸附、降解部分水体悬浮物和营养物质，从而提升水质，改善水体环境。

（8）湖泊生态系统构建技术

以水生高等植物为主，多种植物并存，具有高度生物多样性的健康湖泊生态系统，具备净化水体提高水质的生态功能。通过恢复湖泊水生高等植物群落，优化生态系统结构，构建健康的湖泊生态系统，是湖泊富营养化控制的重要措施。沉水植物如苦草、狐尾藻、金鱼藻、菹草等是湖泊生态系统结构的重要组成部分，是控制营养物质循环，维持湖泊生物多样性的因素之一。沉水植物可以稳定和改善基质，增加溶解氧，吸附悬浮物，抑制藻类生长，提高水体透明度。在湖泊生态修复工程中提高沉水植物的覆盖度是一项重要任务。浮叶植物如菱、荇菜、睡莲、王莲等是水生高等植物恢复的先锋型植物，去除氮、磷的作用显著，浮叶植物还能遏制沉积物再悬浮，具有改善水质的综合功能。挺水植物如芦苇、蒲草、荸荠、水芹、荷花、香蒲、慈姑等是湖滨带主要植物，具有去除氮、磷，改善水质的功能。在生态修复工程中，促进挺水植物群落恢复，有利于湖滨带至敞水区植物的连续性布局，形成完整的生态结构。以挺水植物为主体的湖滨带植物群落，构成了湖泊的缓冲带，阻止和吸附污染物直接进入敞水区。

7 河湖地貌形态保护与修复

7.1 一般规定

7.1.2 提高河流形态空间异质性是提高生物群落多样性的重要前提之一。尽可能提高河流形态的异质性，使其符合自然河流的地貌学原理，为生物群落多样性的恢复创造条件。河流生态系统生境的主要特点是：水-陆两相和水-气两相的联系紧密性；上中下游的生境异质性；河流纵向的蜿蜒性；河流横断面形状的多样性；河床材料的透水性等。水-陆两相和水-气两相的紧密关系，形成了较为开放的生境条件；上中下游的生境异质性，造就了丰富的流域生境多样化条件；河流纵向的蜿蜒性形成了急流与缓流相间；河流的横断面形状多样性，表现为深潭与浅滩交错；河床材料的透水性为生物提供了栖息所。由于河流形态异质性形成了在流速、流量、水深、水温、水质、水文脉冲变化、河床材料构成等多种生态因子的异质性，造就了丰富的生境多样性，形成了丰富的河流生物群落多样性。

河流廊道自然化工程的布局方法。在流域尺度上，通过遥感图像历史与现状的对比分析，评价河道发展演变的过程和趋势。通过分析流域降水与气候变化；水资源开发利用状况；土地利用方式变化；水土保持作用；泥沙冲淤变化等多因素，分析河道演变的成因。通过河道人工干扰前后变化，评价对水生生物群落的影响。综合自然条件变化和人类活动影响，根据河流廊道生态系统退化程度，确定重点修复河段并进行优先排序。

河流廊道自然化工程基本设计方法包括类比法、水文-地貌经验公式法和河道演变数值分析。（1）类比法。类比法有两种类型，一种是建立参照河段。参照河流可以选在待修复河段的上下游，也可以选在具有类似地貌特征的其它流域。参照河段与待修复河段具有相似的水文、水力学和泥沙特征，河床及河岸材料粒径也具有相似性。特别是参照河段的自然形态未遭受人工改造且河势稳定。另一种类比法是参照目标河段的历史状况，通过文献分析、遥感信息解读和野外勘探取样等手段，重现河段未被改造的蜿蜒地貌形态。有了可以类比的河段，就可以结合待修复河段的具体地形、地貌、纵坡和水文特征，以类比河段为模板设计河道地貌参数。在此基础上，利用水力学数值分析软件进行计算校验。（2）水文-地貌经验关系式。河流地貌过程是一个动态过程。在长期演变过程中，河流径流、泥沙输移与地貌形态三者形成某种相对平衡状态。河流流量与河流地貌形态特征具有明显的相关关系。河流地貌特征是对特定河流水文、泥沙过程的响应。因此，可以通过河流地貌特征野外调查，收集对应的水文情势数据，运用统计学方法建立水文-地貌经验关系式。经验关系式具体应用时需要根据当地水文、地貌调查数据，确定公式各项参数。同样，初步确定各项参数以后，还需要利用水力学数值分析软件进行计算校验和调整。（3）河道演变数值分析。可模拟动床的泥沙输移、淤积过程，预测河床形态变化，包括河床轮廓、河宽变化、弯曲河段次生流作用引起沙质河床再造以及河道侧向位移，以及在河道现状基础上增加控导工程（如丁坝）后河道演变过程，检验恢复蜿蜒性的效果。利用河道演变数值分析技术，还可以预测设计方案的河道泥沙输移和淤积过程，评价河势稳定性。河道演变数值分析需要有足够的泥沙和地貌数据支持，并且需要对模型进行校验和调整。

城市地区河道治理目标是统筹河道的行洪、排涝、景观与休闲等多种功能，

利用有限的城市空间,增添、恢复更多的自然因素,避免渠道化、商业化和园林化,使充满活力的河流成为城市的生态廊道,使生活在闹市中的市民能够享受田园风光和野趣,创造绿色生态的宜居环境。城市河道治理规划设计要点如下:(1)城市河道治理规划要与城市总体规划和城市功能定位一致,并与防洪规划、水污染防治规划、城市交通规划、绿化规划和各类管线建设规划相协调。(2)明确城市河道功能定位,确定河流空间总体布局,形成河道-湖泊-小微水体连通的河流廊道完整系统。在河流廊道系统中布置景观节点,形成各具特色的自然景观。

(3)防洪排涝、防污治污、生态保护修复和自然景观修复一体化的综合治理。河道整治应满足城市防洪规划的要求,对堤防稳定性进行复核,对堤防安全隐患进行加固处理。实现污水的深度处理,完善污水处理管网建设,治理黑臭水体,实行雨污分流,实现水功能区达标。(4)恢复城市水面。主要是恢复河湖改造前的水面,把改造成地下涵管的河道恢复成地面河道,以及恢复原有的湖泊。需要按照当地水资源禀赋,统筹规划生活、生产、生态和景观用水,论证确定河湖水面面积占城市国土面积的适宜比例。恢复水面势必增加蒸发损失,因此对于水资源短缺地区,恢复水面应持谨慎态度,需要经过充分论证确定方案。(5)采用多样化的河道断面。根据现场空间可能性,布置自然断面或非几何对称断面。可以采用复式断面,以便在非汛期利用更多的河滨带空间布置绿化带和休闲场所。同时,沿岸布置亲水平台和栈道等亲水设施。(6)采用活植物及其他辅助材料构筑河湖堤岸护岸结构,实现稳定边坡、减少水土流失和改善栖息地等多重目标。选择可以迅速生长新根且具耐水性能的本植物。采用生态型岸坡防护结构,诸如生态型挡土墙、植物纤维垫、土工织物扁袋、块石与植物混合结构等。

(7)植物修复设计。以乡土植物为主,经论证适量引进观赏植物,防止生物入侵。选择具有净化水体功能的植物如芦苇、菖蒲等植物。按照不同频率洪水水位,确定乔灌木各类植物搭配分区。植物搭配需主次分明,富于四季变化,营造充满活力的自然气息。(8)通盘考虑道路、交通、停车场布置。特别注意绿色步道和自行车道的沿河、沿湖布置,把景观节点和休闲林地串联起来。(9)提高水动力性。通过疏浚通畅河道;拆除失去功能的闸坝;改善闸坝群调度方式以提高水动力性。在小型河流局部河段,可用水面推流器强化水体流动,保持紊流区流态,增加溶解氧含量,抑制藻细胞生长速率,防止水华发生。

7.2 河湖水系生态连通

7.2.1 恢复河湖水系连通性是河湖生态修复的重要措施之一,不透水堤防、护岸、闸坝等工程导致河湖横向、纵向、垂向连通性破坏,引起河湖水系阻隔、河湖洪水漫溢过程阻断、水体渗透性破坏等现象时,应进行河湖生态连通性修复。河湖水系连通包括水系物理通道连通和水文连通。河湖水系物理连通性是水系地貌空间结构连通情况,是流域内河流与湖泊、河道与河漫滩之间物质流、信息流和物种流保持畅通的基本条件,也是水生态系统结构参数之一;水文连通是水系在一个水文周期内呈现出的连通、不连通、半连通等水流动态特征,河湖间的水文连通保证了注水和泄水的畅通,维持着湖泊最低蓄水量和河湖间营养物质交换。

7.2.2 水系生态连通工程措施在纵向上包括河道生态清淤、新建生态河道、过鱼设施建设、闸坝生态改造、废弃闸坝拆除、仿生式多组合生态净水堰等,在横向上包括河湖通道恢复、堤防后靠、滩区小微水体连通、开口式堤防等,在垂向上包括渗透区保护、拟自然减渗、河床底质重构、低影响开发等;水系生态连通非工程措施包括兼顾生态保护的水库调度、水闸优化调度、岸线和滩区保护等。

7.2.4 河湖水系纵向连通包括河流支流与干流、支流与支流、河流上下游的连通等；横向连通包括河流与湖泊、河流与沼泽、河流与蓄滞洪区、河流与河滩地的连通等；垂向连通包括河湖水系地表水与地下水之间的连通。

7.3 平面形态

7.3.1 选择制定洪水治导线、中水治导线或枯水治导线，维持和修复局部弯道、深潭、浅滩、故道、洲滩以及河滨带等自然景观格局多样性特征。中水治导线宜根据造床流量分析确定，对于自然河流，平滩流量可认为是造床流量，可取重现期为 1.5 年的洪峰流量作为平滩流量。治导线宜平顺、光滑，在弯曲段可采用复合弧段连接，应论证治导线的合理性和可行性，重要河段需开展河工模型试验。在土地利用条件许可的前提下，需保护与修复河流平面形态的蜿蜒性特征；如果条件限制，要保护和修复河流主河槽的蜿蜒性特征。

河流平面形态可以分为三种类型：蜿蜒型（sinuosity/meandering）、微弯顺直型（straight- low sinuosity）和分汉型（multichannels）。其中分汉型又可分为辫状型（braided）、网状型（anastomosing/anabranching）和游荡型（wandering）。河段的顺直或弯曲可用弯曲率判断，弯曲率是指沿河流中心线两点之间的长度与这两点间直线距离的比值。如果弯曲率值在 1.0~1.05 范围内，则属于直线型河道，1.05~1.3 属于微弯型河道，1.3~3.0 属于蜿蜒型河道。微弯型河道多出现在河流的上中游，而在宽阔、平坦的下游地区多为蜿蜒型河道。河流平面形态分类示意图见图 1。

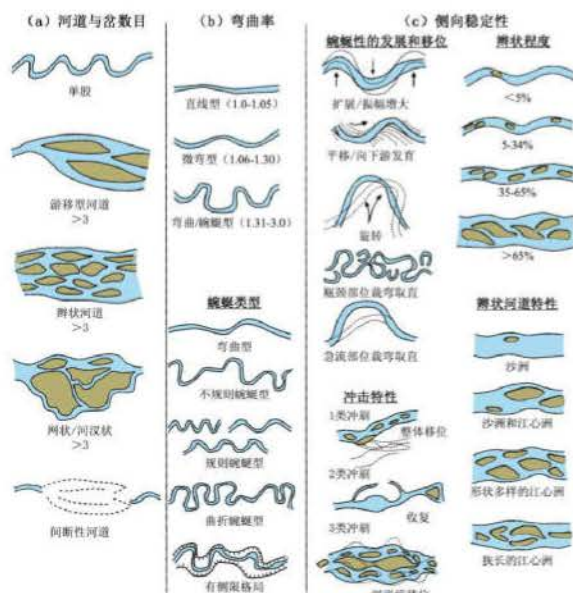


图 1 河流平面形态分类示意图

7.3.2 确定堤防间距时，河槽和河漫滩不仅要能满足设计洪水行洪要求，还要

保持一定的浅滩宽度和植被空间，为生物的生长发育提供栖息地，发挥河流的自净化功能。

7.3.3 河流平面形态蜿蜒性修复可在小空间尺度下通过人工堆石、设置构造物、在河流横断面上设置深潭-浅滩序列等措施，恢复局部水流的蜿蜒特性，也可在河流的某段区间或整段河道通过改变河道的平面形状进行大尺度修复。

河流平面形态设计方法如下：

1.水文-地貌经验关系式

蜿蜒型河道的河道宽度、深度、坡降和平面形态是相互关联的变量。这些变量的量值取决于河流流量和径流模式、泥沙含量以及河床基质与河岸材料等因素。一般认为，水文过程的关键变量是平滩流量 Q_b ，平滩流量决定河流的平均形态。设计中常依据 Q_b 设计河流的断面和河道平面形态，如河宽、水深以及弯道形态等。通过大量河段样本调查分析，运用统计学方法，有若干平滩流量 Q_b 与河流地貌参数之间的经验关系式，其通式用幂函数表示：

$$W=\varphi_1Qn_1b \tag{4}$$

$$D=\varphi_2Qn_2b \tag{5}$$

$$S=\varphi_3Qn_3b \tag{6}$$

式中： W ——河段平均宽度(m)； D ——河床平均深度(m)； S ——河段平均纵坡； Q_b ——平滩流量 (m^3/s)； $\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3,n_1,n_2,n_3$ ——统计系数。

这些公式是根据特定河段样本数据统计归纳的经验公式，如果把这种经验关系式推广到别的流域，就需要论证水文、泥沙、河床材料的相似条件。即使具备应用条件，也需要结合本地的具体情况验证和校验，采用适宜的系数。

2. 蜿蜒型河道平面形态参数计算

设计蜿蜒型河道，首先需要确定河道的主泓线。反映蜿蜒型河道主泓线特征的地貌参数包括：蜿蜒波形波长 L_m ，蜿蜒河道波形振幅 A_m ，曲率半径 R_c ，中心角 θ ，半波弯曲弧线长度 Z 。各参数定义见表 4，参见图 2。计算蜿蜒型河道参数常采用水文地貌经验关系公式。用蜿蜒波形波长 L_m 与平滩流量 Q_b 之间关系式，可以计算蜿蜒波形波长 L_m 。用 L_m 与河道平滩宽度 W 间关系经验公式，可以计算河道平滩宽度 W 。用曲率半径 R_c 与 L_m 间关系经验公式，可以计算曲率半径 R_c 。计算出平面形态参数后，即可用试画法绘出河道主泓线。

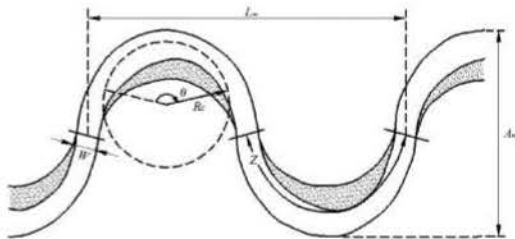


图 2 蜿蜒性河道地貌参数

表 4 蜿蜒型河道平面形态参数

参数	定义
平面形态	

蜿蜒波形波长 L_m	相邻两个波峰或波谷点之间距离 (m)
蜿蜒河道波形振幅 A_m	相邻两个弯道波形振幅 (m)
曲率半径 R_c	河道弯曲的曲率半径 (m)
中心角 θ	河道弧线中心角
半波弯曲弧线长度 Z	半波弯曲弧线长度 (m)
断面形状	
平均深度 D_m	断面面积/河道平均宽度 W (m)
深槽深度 D_{max}	最大深槽断面处深槽深度 (m)
河道平滩宽度 W	平滩流量下河道宽度 (m)
拐点断面河道宽度 W_i	拐点断面 A-A'河道宽度 (m)
最大深槽断面河道宽度 W_p	最大深槽断面 B-B'河道宽度 (m)
弯曲顶点断面河道宽度 W_a	弯曲顶点断面 C-C'河道宽度 (m)

(1) 蜿蜒波形波长 L_m 与平滩流量 Q_b 间关系经验公式

$$L_m=aQ_b^{k_1}l^b \tag{7}$$

式中： Q_b ——平滩流量(m^3/s)； L_m ——蜿蜒波形波长(m)； a,k_1 ——系数，为河流调查统计参数,见表 5。

表 5 系数 a 和 k_1 建议值

序号	a	k_1	作者	年份
1	54.3	0.5	Bravard P	2009
2	61.21	0.467	Ackers 和 Char	1973
3	38	0.467	Nunnally 和 Shieds	1985

(2) 蜿蜒波形波长 L_m 与河道平滩宽度 W 间关系经验公式

$$L_m=k_2W \tag{8}$$

式中： L_m ——蜿蜒波形波长(m)； W ——河道平滩宽度 (m)； K_2 ——系数，见表 6

表 6 系数 k_2 建议值

序号	k_2	作者	年份	河流样本
1	11.26~12.47	Soar 和 Thorne	2001	438
2	11	William J.Mitsch	2004	
3	12.4	Newbury 和 Gaboury	1993	

(3) 曲率半径 R_c 经验公式

①Mitsch (2004) 建议的公式：

$$R_c=L_m/5 \tag{9}$$

式中： L_m ——蜿蜒波形波长(m)； R_c ——曲率半径(m)。

观察图 2，如果蜿蜒波形采用交错的上下两个半圆，则 $R_c=L_m/4$ ，说明式(9)表示的弧线中，两个半圆之间还有直线段相连，直线段正是浅滩的位置。令式(8)中 $k_2=11$ ，代入式(9)可得

$$R_c=2.2W \tag{10}$$

式中： R_c ——曲率半径(m)； W ——河道平滩宽度(m)。

②Newbury(1993)建议公式：

$$R_c = (1.9 \sim 2.3) W \tag{11}$$

③美国陆军工程兵团 (USACE, 1994) 建议的公式：

$$R_c = (1.5 \sim 4.5) W \tag{12}$$

(4) 半波弯曲弧线长度 Z 经验公式

半波弯曲弧线长度 Z 约等于相邻两个浅滩的曲线距离 (图 2)。 Z 与河床基质粒径、河道纵坡、河道宽度有关。一些学者根据野外调查结果用统计方法给出 Z 与河道平滩宽度 W 的关系式。

$$Z = k_3 W \tag{13}$$

式中： Z ——半波弯曲弧线长度(m)； W ——河道平滩宽度(m)； k_3 -系数，见表(7)，其中岩基河床纵坡为 0.001-0.014。

表 7 公式(13)系数 K_3

序号	k_4	河床基质	作者 (年份)	河流样本
1	3~10	砂砾石河床 ($d_{50} > 3\text{mm}$)	Keller (1978), Hey (1986)	
2	6	岩基河床	Keller (1978), Hey (1986)	
3	4~10	砂砾石河床 ($d_{50} > 3\text{mm}$)	Hey (1986)	62

7.4 河滨带和湖滨带

7.4.1 水域岸线划定时需要与水域蓝线、生态保护红线、城镇开发控制线、基本农田控制线等系统相衔接。

7.4.2 城镇段主要针对人类活动较为频繁的河道、湖泊，通过工程、非工程措施和管理措施的实施，在人与自然和谐共生的前提下进行污染防治，保护、培育、修复生态系统。乡村段主要针对人口密度稀疏地区、土地资源相对丰富、污染负荷较低的流域，通过近自然工法，使河湖的状态接近于原本的自然状态，恢复河湖的生态系统平衡。地方政府已明确管控目标的，复核管控目标，必要时提出管控目标的修改意见和建议，不需调整的执行地方政府制定的目标。

7.4.3 河滨带植被重建需优先选择乡土植物，并依据河滨带的主体功能，选择具有相应功能的植物。河流岸坡土壤含水率随水位变化呈现规律性变化，应依据不同水位高程选择岸坡植物种类。从岸坡顶部（堤顶）向下共划分为岸坡顶部（堤顶）到设计洪水位、设计洪水位到常水位、常水位以下 3 个高程区区间，各区间植物类型分别为中生植物、湿生植物、水生植物，其中水生植物又区分为沉水植物、浮叶植物和挺水植物。

植物种类配置需遵循乔灌木相结合、物种互利共生、常绿树种与落叶树种混交、深根系植物与浅根系植物相结合等原则。河滨带植被重建，要坚持自然化原则，以自然状态河漫滩的植物群落为模板，营造近自然的植被景观。近自然植被构建不同于城市园林绿化，要避免后者植物种类单调，植物布置整齐划一以及修剪造型的人工造景方法。所谓近自然植被构建是指选择以乡土植物为主体的植物种类，不同植物的合理配置，种植密度的稀疏，都应仿照自然植被布局。比如不同的乔木树种可采取株间或行间混交；灌木随机布置在乔木株间或行间；草本植物播撒在整个河滨带。生境营造设计应包括微地形营造、人工栖息地营造等内容。

7.4.4 在管理范围的基础上,可根据外围实际情况向陆域和水域纵深适当外延湖滨带保护与修复范围。湖滨带保护与修复的主要任务,一是清除非法侵占湖滨带的建筑、设施、道路、农田、鱼塘,取缔非法挖沙生产,恢复湖滨带地貌特征;二是控源截污,截断流域污染物入湖通道,重建缓冲带结构。三是湖滨带植被恢复和重建。。生态修复工程可持续运行的周期不宜低于2年。应采用本土植物,仿原生自然状态合理搭配乔灌木结构。

生态功能定位与分区是湖滨带生态修复设计的基础。总体上,湖滨带主要生态功能包括:生物多样性保护;缓冲带功能;岸坡稳定功能;景观美学功能;经济供给功能。对于具体的大中型湖泊而言,湖滨带不同区域的主体生态功能各有侧重。在湖泊生态修复工程设计中,为突出湖滨带不同区域的修复重点,需要进行生态功能定位和分区。根据规划湖泊的历史与现状特征分析,明确湖滨带不同区域预期恢复的主体生态功能,据此划分主体生态功能分区。每个区域除一种主体功能外,还可划分多种非主体功能。在进行生态修复设计中,以主体生态功能修复为重点,同时也应兼顾其他类型的生态功能修复。

7.4.5 水库消落带受库区气候、水文和水库调度运行等方面影响,具有淹没时间长、水位涨落幅度大、空间范围广、生态系统脆弱等特征。需对消落带现有植被群落进行调查,优先选用筛选出的消落带原有植物品种,新增物种原则上以乡土耐涝植物为主;优先选择耐污、净化力强和养护管理简易的品种;陆域植物系统应包括乔、灌、草的组合配置;水生植物群落配置以种植水深0.2~2.0 m的挺水、浮叶、沉水植物为主。通过陆域和水域植物系统构建,丰富消落带生物多样性,确保消落带植被的覆盖率达到75%以上;对坡度0°~25°区域进行植物修复,25°以上区域采取封禁治理等自然修复措施防止水土流失。植物种植完成后,要对种植区域进行合理的管理和维护工作,监测植物的生长情况,同时对水库水位的高涨低落做出合理的应急预案,妥善安排好汛后植物的补植工作。

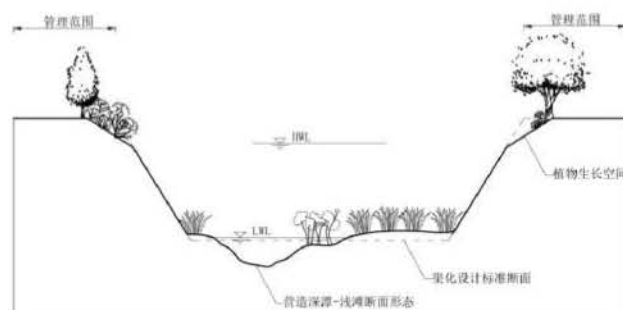
7.5 河道断面多样性

7.5.2 在不同尺度上,河道纵剖面显现的地貌特征不同,尺度越小,显现的地形地貌细节越多,尺度越大,越能反映河流演变趋势。河道坡降的确定可采用以下途径:(1)河流水沙条件变化不大,可参考过去对待修复河段有约束作用的上游和下游河段的有关调查资料。(2)如在修复工程附近存在一段天然河道,并且具有类似的流量和泥沙特征,可参考该河段进行修复设计。(3)根据待修复河段附近的河谷坡降和蜿蜒度确定河道坡降。

进行河道实地测量工作时,测量点的选择需满足:(1)选择横断面上深泓位置作为测量点;(2)测量范围要扩展到待修复河段的上下游,需包括深潭浅滩、河漫滩等地貌单元特征和相关已建工程设施;(3)要包括深潭、河漫滩和已建工程。

7.5.3 河道横断面设计原则包括:①确保行洪需要,特别是设有堤防的河道,应保证在设计洪水作用下行洪安全。②尽可能采用接近自然河道的几何非对称断面,即使采取对称断面也应采取复式断面。③选择适宜的断面宽深比,防止淤积或冲刷,宽深比是控制性指标,适宜的宽深比具有较高的过流能力,还可防止泥沙冲淤,其与河床基质材料和河岸材料类型有关。④蜿蜒型河道布局设计,应符合深潭-浅滩序列规律,形成缓流与急流相间,深潭与浅滩交错的格局。⑤根据河流允许流速选择河床材料类型和粒径。⑥断面设计应与河滨带植被恢复或重建综合考虑。

河道横断面设计需先确定河流平面形态后，选择适宜的河床形态（如深潭、浅滩、边滩等地貌单元的合理分布），最后再确定河道的宽深比，可根据河流分类模式参考类似河流或河段的资料，或根据经验关系（如流域面积与宽深比的关系）来确定宽深比，也可根据水力学相关经验公式进行计算。对渠道化河道断面进行生态化改造时，可以复合型断面作为典型断面，在满足设计洪峰流量和平滩流量基础上，对典型断面进行局部调整，以形成多样化的横断面形态，调整后的横断面应具有主河槽、河漫滩、河滨带等多种结构。多样化的断面形态示意图见图 3。



HWL-高水位 LWL-低水位
图 3 多样化的断面形态示意图

7.5.4 深潭-浅滩序列是自然蜿蜒性河流的主要特征，深潭与浅滩的基质有所不同。深潭的基质是颗粒较细的泥沙，浅滩河床是由粗糙而密实的卵石构成。修复时，浅滩急流段直铺设砂砾石和卵石。铺设材料以混合型的砂砾石为主，其中具有尖角的砂砾石占有相当比例，这样有利于砂砾石之间互相咬合。在急流河段布置大卵石、大漂石可以形成一系列小型堰坝成为鱼梁，创造鱼类适宜栖息地。需注意鱼梁高度不宜超过 30cm，以不影响鱼类局部洄游。在浅滩铺设基质材料的厚度，要求浅滩相对高出平均纵坡线，使得在纵剖面上，形成深潭-浅滩地形起伏的纵断面。

深潭具有以下特征：①深潭位于蜿蜒河道的顶点，水深相对较深，流速缓慢；②断面形状多为非对称，通常比浅滩断面狭窄 25%左右；③深潭河床由松散砂砾石构成，当流量较小时显露出砂砾石浅滩及沙洲；④深潭周期性被泥沙充填，特别是当上游河岸因侵蚀崩塌形成的大量泥沙输移到下游时，泥沙会充满深潭。但当下次洪水到来后，泥沙又会被冲刷到下游邻近的深潭中，原有深潭得到恢复。⑤深潭对于大型植物和鱼类至为重要。深潭面积占栖息地总面积的 50%左右。当水流通过河流弯曲段时，深潭底部的水体和部分基底材料随环流运动到水面，环流作用可为深潭内的漂浮生物和底栖生物提供生存条件。对于鱼类而言，深潭-浅滩序列具有多种功能，深潭里有木质残骸和其他有机颗粒可供食用，所以深潭里鱼类生物量最大。卵石和砾石河床具有匀称的深潭-浅滩序列，粗颗粒泥沙分布在浅滩内，细颗粒泥沙分布在深潭中，不同的基质环境适合不同物种生存。⑥纵坡比降较高的山区溪流也有深潭依次分布格局，但是没有浅滩分布，水体从一个深潭到下一个深潭之间靠跌水衔接，形成深潭-跌水-深潭系列，这种格局

有利水体曝气，增加水体中的溶解氧。

浅滩具有以下特征：①浅滩段起点位于蜿蜒河流的弯段末端，其长度取决于纵坡，纵坡越大浅滩段越短。浅滩段河道横断面形状大体是对称的。②浅滩段水深较浅，流速相对较高，枯水期表现出紊流特征。③浅滩河床是由粗糙而密实的卵石构成。修复时可在浅滩段布置大卵石，其目的是在枯水季节水流冲击大卵石形成紊流。④浅滩地貌是一个动态过程。洪水过后，浅滩段河床被上游冲刷下来的泥沙所充满。这些多余的泥沙将由随后的洪水输移到下游的深潭中。⑤浅滩段占河流栖息地的 30—40% 左右。幼鱼喜欢浅滩环境，因为在这里可以找到昆虫和其他无脊椎动物作为食物。浅滩段水深较浅，存在更多的湍流，有利于增加水体中的溶解氧。砾石基质的浅滩有更多新鲜的溶解氧，是许多鱼类的产卵场。贝类等滤食动物生活在浅滩能够找到丰富的食物供应。粗颗粒泥沙分布在浅滩内，成为许多小型动物的庇护所。

一般来说，待修复河道的河床需铺设基质材料以促进深潭-浅滩序列的形成，特别是当目标河段位于水库大坝下游，由于水库拦水拦沙，使得下游河道的来沙（包括悬移质和推移质）大幅减少时。铺设河床基质设计需要掌握的原则是：①具有足够的稳定性，保持河道泥沙冲淤平衡。竣工后经长期运行，河段纵坡和横断面都不会发生重大变化。②提高河流栖息地质量，为保护物种提供良好的栖息地条件。③提高美学价值，创造优美的水景观环境。基质铺设设计的一般步骤是：①调查评估河床基质现状，包括河床材料构成、材料类型（卵石、砂砾石、沙质土、砂黏土、淤泥等）、河床材料特征（粒径、角状、嵌入程度等）。②调查河段基质的历史状况和发生的变化，如渠道化、泥沙淤积、建筑垃圾倾倒。调查评估河床稳定性和河势稳定性，主要是河段的冲刷和淤积状况。③选择同一流域未被干扰的河段，其河床稳定且河道地貌具有多样性特征。比照参照河段设计基质材料类型、级配。④列出目标河段生物种群清单，明确保护物种及其栖息地需求。按照物种的生活习性，选择适宜的基质构建相关栖息地，如鱼类产卵栖息地、滤食动物栖息地以及水禽自由漫步的鹅卵石条件。⑤当地砂卵石资源评估。包括化学成分、粒径、级配、资源规模以及开发可能性等。⑥明确河段的修复目标。包括修复特定指示物种栖息地、保持河床泥沙冲淤平衡、提高美学价值、改善人居环境等。

7.6 生态型护岸

7.6.1 河流岸坡尽量采用缓坡形式，可以针对偶然性洪泛带、季节性洪泛带、沿岸水位变动带、淹没带等几种类型，根据水文地貌特点分别选择适宜的护岸形式。

7.6.2 河道岸坡的稳定性分析需要考虑两方面因素，一是水流作用导致河床和坡脚冲刷侵蚀（局部失稳），二是岸坡的整体失稳。水流冲刷侵蚀导致河床和坡脚土体局部失稳并随水流逐渐流向下游，丧失对岸坡上部土体的支撑作用。岸坡土体在重力、渗流荷载作用下，如其强度不足，则将发生整体失稳，失稳型式表现为滑动和崩塌等。岸坡植被系统可降低土壤孔隙压力，吸收土壤水分。同时，植物根系能提高土体的抗剪强度，增强土体的粘结力，从而使土体结构趋于坚固和稳定。植被系统具有固土护岸，降低流速，减轻冲刷的功能，同时为鱼类、水禽和昆虫等动物提供栖息地。

7.6.3 河床基质性质、河流的植被类型和结构、河流形态（蜿蜒度、断面、纵坡）、断面内有无阻水障碍物等因素，都对糙率产生影响，河流的糙率通常由实测确定。

一般选择比较顺直、断面形状变化不大的河段，测量其流量和河段长度，并由实测水文资料推求平均断面面积、平均底坡或水面坡度，利用均匀流公式推求 n 值。在没有实测资料时，可根据河道具体情况适当选取糙率 n 值，见表 8。

表 8 自然河流的糙率 n 值

河流类型和状况			最小值	正常值	最大值
小型河流 （洪水位水面宽度<30m）	（1）平原河流	①清洁、顺直、无深潭-浅滩	0.025	0.030	0.033
		②同①，但石块和杂草多	0.030	0.035	0.040
		③清洁、弯曲、有深潭-浅滩	0.033	0.040	0.045
		④同③，但有石块和杂草	0.035	0.045	0.050
		⑤同③，水深较浅，河底坡度多变，回流区较多	0.040	0.048	0.055
		⑥同④，但石块多	0.045	0.050	0.060
		⑦多杂草、有深潭、流动缓慢	0.050	0.070	0.080
		⑧多杂草、多深潭、林木滩地上的过洪	0.075	0.100	0.150
	（2）山区河流（河槽无草树、河岸较陡、过洪时淹没岸坡树丛）	①河底为砾石、卵石、间有孤石	0.030	0.040	0.050
		②河底为卵石和大孤石	0.040	0.050	0.070
大型河流 （洪水位水面宽度>30m）	平原及山区河流	①断面比较规则、整齐，无孤石或丛木	0.025		0.060
		②断面不规则整齐、床面粗糙	0.035		0.100
汛期河滩漫流	（1）草地无树丛	①短草	0.025	0.030	0.035
		②长草	0.030	0.035	0.050
	（2）耕地	①未熟庄稼	0.020	0.030	0.040
		②已熟成行庄稼	0.025	0.035	0.045
		③已熟密植庄稼	0.030	0.040	0.050
	（3）矮树丛	①稀疏多杂草	0.035	0.050	0.070
		②夏季不茂密	0.040	0.060	0.080
		③夏季茂密	0.070	0.100	0.160
	（4）树木	①田地平整、干树无枝	0.030	0.040	0.050
		②同①，但干树多新枝	0.050	0.060	0.080
		③密林，树下植物少、洪水位在树枝下	0.080	0.100	0.120
		④同③，但洪水位淹没树枝	0.100	0.120	0.160

7.6.4 无纺土工织物作为反滤层时，要满足保土性、透水性、防堵性和强度等准则，主要设计指标包括等效孔径、孔隙率和法向渗透系数等，并满足拉伸强度和刺破强度要求，必要时需进行植物可扎根和可顶穿试验。

7.6.5 覆土类型主要有利用原有表土、移植草皮、卵石覆盖及填缝型覆土。可利用开挖、疏浚的土方铺设于硬质衬砌表面，且覆土厚度应满足植被立地条件。加固措施包括纵向铺设纤维毯、坡脚抛石、石笼、木桩、枝条栅栏等。原位植生式生态化改造技术是保留部分原硬质护岸作为支撑骨架，将其余切割破碎后的硬质碎块放置在新布设的生态格网中进行原位利用，并混合乡土植被种子，形成土体-原护岸骨架-格网-植被的整体化结构，能够保证改造后岸坡的整体稳定性。

7.7 河道内地貌单元生态重建

7.7.1 河道内地貌单元生态重建技术主要指利用木材、块石、适宜植物以及其他生态工程材料在河道内局部区域构筑的特殊结构,这类结构可通过调节水流及其与河床或岸坡岩土体的相互作用而在河道内形成多样性地貌和水流条件,例如水的深度、流速、急流、缓流、湍流、深潭、浅滩等水流条件,创造避难所、遮蔽物、通道等物理条件,从而增强鱼类和其他水生生物栖息地功能,促使生物群落多样性的提高。河道内地貌单元根据空间尺度可分为宏观、中观和微观三种类型。宏观指河流系统本身,规模可达数十公里;中观栖息地主要指河段范围,尺度为几十米到几公里左右;微观主要指尺度为几米甚至更小的微栖息地结构。

7.7.2 生态堰是利用块石、填料等材料建造的跨越河道的透水仿生式多组合生态净水建筑物,可采用单个或沿河流上下游阶梯式布置的方式,是水利工程、生态工程和环境工程技术的融合。生态堰作用主要表现在四个方面:生态堰在上游形成一定水面,在下游形成跌水景观,并可结合内部填料起到净水作用;上游的静水区和下游的深潭周边区域有利于有机质的沉淀,为无脊椎动物提供营养;堰坝下游所形成的深潭或跌水潭有助于鱼类等生物的滞留,在洪水期和枯水期为其提供了避难所,深潭平流层也是适宜的产卵栖息地;因河道中心区强烈的拖曳力,可产生激流和缓流的过渡区,有助于形成摄食通道。根据不同的地形地质条件,生态堰可以具有不同结构型式,在平面上呈 I 字型、J 字型、V 字型、U 型或 W 型等。

7.7.3 在河道内布置的单块卵石(巨砾)或卵石群有助于创建具有多样性特征的水深、底质和流速条件;卵石是很好的掩蔽物,其背后的局部区域是生物避难和休息场所;卵石还有助于形成相对较大的水深、湍流以及流速梯度,曝气作用有助于增加溶解氧。卵石所形成的微栖息地能为水生昆虫、鱼类、两栖动物、哺乳动物和鸟类等水生生物提供庇护或繁殖场所。

卵石群的栖息地加强功能能否得到充分发挥,取决于诸多因素,例如河道坡降、河床底质条件、泥沙组成和水动力学等问题等。卵石群一般比较适合于顺直、稳定和宽浅的河道,而不宜在细沙河床上布置,否则会在卵石附近产生河床淘刷现象,并可能导致卵石失稳后沉入冲坑。设计中可以参考类似河段的资料来确定卵石的直径、间距、卵石与河岸的距离、卵石密度、卵石排列模式和方向,并预测可能产生的效果。砾石群的排列型式见图 4。图中显示了一种卵石群连续 V 形布置方案。左侧上游第一块卵石用坐浆法施工,即在混凝土凝固前靠卵石重力与混凝土紧密结合,成为这组卵石群的基石。在第一块卵石下游布置一对卵石,然后布置一组由 3 块卵石组成的上游 V 形卵石群,再由 4 块小卵石以链条状连接下游 V 形卵石群,形成 V 型组-链条-V 形组布局。卵石间弯曲的缝隙,提供了一条低流速流路,如虚线所示。根据监测数据发现,这条低流速轨迹成为一些物种喜爱的通道。



图 4 砾石群在平面上的排列示意图

7.7.4 阶梯式固床技术适用于河床淘刷严重、紊流突出的河段，石梁式固床技术适用于常流水、河床坡度较缓并且较稳定的河段。阶梯式固床技术采用嵌石阶梯设计，并与两岸亲水设施相配合，其对水流有消能效果，可保护下游河床结构，并调整河床坡降。设计时，每一块石嵌入其高度的 $2/3$ ，踏步台可连接两岸作为亲水设施，阶梯式的下游面平均坡度可缓于 13% （约 $1:8$ ），阶梯的外缘镶嵌较大块石，并高于内侧，使每阶间有足够的水深，以利于鱼类洄游通过，见图5。石梁式固床技术采用大型天然石块构筑于河中形成横向构筑物，设计时避免全断面阻水，以利于水生动物在上下游的迁移；石梁与护岸连接处嵌入护岸，以抵抗水流冲击力；在坡度较陡处可连续设置，形成阶梯式落差，使上游流速降低，增加泥沙沉降，具备拦沙及稳定河床的功能，见图6。河床分区生态控渗技术是利用多种自然材料形成的多层河床基质结构，其在满足河床不同分区渗透性要求的同时，可保证地表水与地下水的连通，通过生态填料的物化作用达到净化水质的目

的，并可提高河床异质性，为生物提供栖息地。

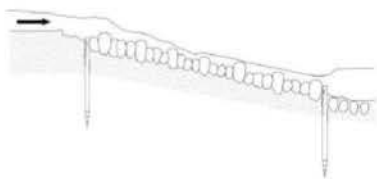


图 5 阶梯式固床技术

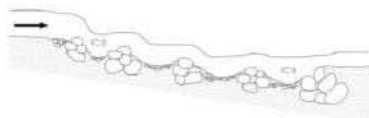


图 6 石梁式固床技术

8 重要水生生物栖息地与生物多样性保护

8.1 一般规定

8.1.1 重要水生生物可以参照《国家重点保护水生野生动物名录》、《濒危野生动植物种国际贸易公约》和地方重点保护水生野生动物名录等，并结合工程区域的地方社会经济需求进行界定。

重要水生生物栖息地是在河湖地貌过程（侵蚀冲刷、泥沙输移和沉积作用等）和水文过程（水温、流量和流速等）等驱动下形成的由河湖地貌形态和结构单元（如河床地形、底质、河岸形态等）等物理环境因素，与栖息在其中的其他生物群落一起构成的水生生物赖以生存和繁衍的空间和环境。对鱼类而言，其栖息地包括其完成全部生活史过程所必需的水域范围，包括产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生活史阶段水域的洄游通道。

8.1.2 生物多样性保护的重点对象是生物群落中特有种和关键种的数量和均匀度，保护策略是提高种群自身维持和恢复能力。

8.1.5 鸟类重要栖息地可采取营造浅滩、生境岛和深水区等工程措施进行生态修复，以为鸟类提供栖息和索饵场所。栖息地生态恢复基质应满足植物生长、微生物附着和底栖动物栖息的需求。

8.2 产卵场、索饵场、越冬场保护与修复

8.2.1 以鱼类为主的重要水生生物资源量受捕捞群体补充量影响，捕捞群体补充量由生物早期资源量决定。早期存活率是影响鱼类早期资源量的关键因素，主要受饵料和敌害两大方面限制，具体包括饵料大小、质量和密度，幼体摄食机能的形成和适口饵料密度高峰出现时间的配合，主要敌害种类和密度等。

8.2.4 人工鱼巢是指为渔业资源增殖的用途出发而投放或建造于水下的人工设施。人工鱼巢类型包括浮动式人工鱼巢、鱼礁式人工鱼巢和护岸式人工鱼巢等。设置人工鱼巢可同时起到多种生态作用。首先，人工鱼巢本身的结构和堆放后的重叠结构造成孔隙和洞穴，成为底栖鱼类栖息和躲避敌害的场所，同时为产卵亲鱼提供产卵和孵化的场所，孵化后的幼鱼也可以获得庇护成长的环境。其次，人工鱼巢投放水域会产生多种流态，包括上升流、线流和流等，造成水体营养盐的混合，促进饵料生物的生长，也为一些鱼类性腺发育及产卵提供了适宜的水文条件。最后，人工鱼巢的表面利于附着生物生长，能形成有效的索饵场。

人工鱼巢一般设置在河道两侧，避开主航道。浮动式人工鱼巢要避开人类活动密集的城镇区域，鱼礁型人工鱼巢投放水域要避免底质淤泥较深区域，护岸式人工鱼巢与生态型护岸相结合设置。投放前根据不同种类的产卵条件和卵的黏附特性，对人工鱼巢的构造、大小、材质，以及投放地点、数量、形式和水深等开展调查研究和试验。

为确保人工鱼巢能长期有效地发挥其正常的功能，在其使用过程中要对其进行必要的维护。定期检查标识物是否完好、构件的连接状况和整体稳定状况，必要时采取加固措施。建立设施档案，对其设计、建造、使用过程中出现的问题及时进行详细记录。

8.3 洄游通道保护与恢复

8.3.1 制定恢复鱼类洄游通道规划需在流域范围内进行，合理制定鱼类洄游目标，选择目标鱼类物种，量化生物、水文、栖息地等生态目标，并需通过监测、调查和评价，识别主要洄游通道，特别要识别溯河/降河性洄游鱼类通道，对于干流、支流、湖泊、水库实行优先排序，选择重点河段和重点水利工程，以解决关键洄游通道问题，并制定分期实施计划。

8.3.2 需根据水利水电工程运行调度情况、过鱼设施工程特点、过鱼对象习性行为及洄游情况，制定过鱼设施运行管理规程，并通过持续过鱼效果监测与评估予以优化，确保过鱼设施的有效运行。

8.3.3 仿自然型鱼道水力计算要点如下：

(1) 流量公式

运行流量 Q 定义为：保证鱼道正常运行的流量或流量范围，年内大部分时间鱼道都能保持运行流量。在运行流量范围内设计鱼道，必须满足溯河洄游鱼类需要的水深，且不超过允许流速。临界流量定义为在某频率下的洪水流量，鱼道设计洪水频率与项目的水工建筑物设计洪水频率标准一致。依据临界流量复核鱼道结构安全性。遇有临界流量发生时，鱼道靠调节进口闸门进行控制。在发生临界流量状况下，无须考虑洄游要求。

明渠平均流速 v_m 根据达西公式计算：

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gr_{hy}I} \quad (14)$$

$$r_{hy} = \frac{A}{L_u} \quad (15)$$

式中： A ——过水断面面积； L_u ——湿周； I ——坡度； r_{hy} ——水力半径； λ ——阻力系数。

渠底凹凸不平，稳态均匀流的阻力系数 λ 按下式计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k_s/r_{hy}}{14.84} \quad (16)$$

(有效条件 $k_s < 0.45 r_{hy}$)

式中： k_s ——粗糙度当量直径，可用砾石平均直径 d_s 表示；混合石材可用粒径 d_{90} 表示。

Scheuerlein(1968)给出底部粗糙的渠道和砾石槛阶梯式缓坡上临界流阻力系

数函数。不考虑水中空气含量，并假定嵌入排列有序的石块堆砌系数为 0.5，该函数如下：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -3.2 \log \left[(0.425 + 1.01I) \frac{k}{h_m} \right] \quad (17)$$

(有效条件 $I=1.8 \sim 1.15$ ，砾石平均直径 $d_s=0.6 \sim 1.2\text{m}$)

式中： k ——嵌入砾石粗糙度， $k=(1/3 \sim 1/2)d_s$ ， d_s ——砾石平均直径。

由平均流速 v_m 和过水断面面积 A ，得到流量 Q ：

$$Q = v_m A \quad (18)$$

(2) 嵌入大砾石渠道的阻力系数 λ

无论是嵌入大砾石的旁路水道还是鱼坡，其总阻力系数 λ_{tot} 应包含两部分，即底部粗糙表面的阻力系数 λ_0 和嵌入大砾石阻力系数 λ_s 。总阻力系数 λ_{tot} 由下式计算：

$$\lambda_{\text{tot}} = \frac{\lambda_s + \lambda_0(1 - \varepsilon_v)}{(1 - \varepsilon_v)} \quad (19)$$

式中： ε_v ——容积比，等于大砾石浸没体积 $\sum V_s$ 与总体积 V_{tot} 之比，即

$\varepsilon_v = \sum V_s / V_{\text{tot}}$ 。 $V_{\text{tot}} = A \times L$ ， A 为大砾石浸湿表面积， L 为水道段长度。 ε_0 ——面积比，等于大砾石表面积与底总面积之比，即 $\varepsilon_0 = \sum A_{0,s} / A_{0,\text{tot}}$ ， $A_{0,s}$ 为大砾石表面积， $A_{0,\text{tot}}$ 为基底总面积， $A_{0,\text{tot}} = L_u \times L$ ， L_u 为水道横断面湿周长度， L 为水道段长度。

$$\lambda_s = 4C_w \sum A_s / A_{0,\text{tot}} \quad (20)$$

式中： C_w ——形状阻力系数， $C_w \approx 1.5$ ； A_s ——大砾石浸湿面积； $A_s = d_s \times h^*$ ， d_s ——砾石直径； h^* ——若水仅环绕砾石流动，则 h^* 等于平均水深 h_m ，若砾石完全浸没，则 h^* 等于砾石高度 h_s (图 7)。

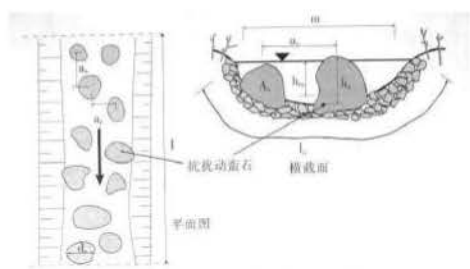


图 7 大砾石阻力系数计算 (据 FAO & DVWK)

8.4 增殖放流

8.4.1 增殖放流是在对鱼、虾、蟹、贝类等水生生物进行人工繁殖、养殖或将所捕捞天然苗种在人工条件下培育后，投放到其资源量出现衰退的天然水域中，使其自然种群得以恢复的水生生物资源增殖措施。人工增殖放流是目前恢复水生生物资源量的重要和有效手段，在国内外有着大量成功应用的案例。

8.4.2 以资源增殖为目的的增殖放流应遵循以下原则：（1）选择品种时应充分考虑到该物种完成生活史的生境需求，通过前期投放形成一定的初始种群规模，能够在天然水体中自行生长、发育达到性成熟，最终自然繁殖，形成具有一定生态功能的水生生物种群。（2）资源增殖时应充分考虑外来种入侵的可能，投放土著种类为主，非土著种类的投放，需要经过严格的科学论证，以保证生态安全。第三，资源增殖时应依据生物的生态习性、水域饵料生物资源状况，确定投放种类，以充分利用饵料资源。第四，可搭配投放不同生态类型的种类，充分利用水生生态系统各类生物资源，从而起到改善水生生物群落结构，加速物质循环和能量流动，维持生态系统健康的作用。

8.6 水温影响减缓

8.6.3 需将分层取水方案与指示生物全生命周期响应通过长期监测数据建立相关关系，对于不同鱼类、不同季节的鱼卵发育过程等需重点关注。

8.7 下泄饱和和气体影响减缓

8.7.1 大坝在泄水过程中，过坝水流在高速掺气以及与下游水体的强烈碰撞作用下，大量空气通过急剧增加的水气交界面被卷吸入水体，引起大坝下游水体溶解气体浓度过饱和。
气体过饱和和主要会对中、上层生活的鱼类造成影响，气泡的形成可引起血液流动阻塞、鱼鳔过度膨胀或破裂，导致鱼类在水中呼吸阻塞和窒息死亡。

8.8 其他保护措施

8.8.2 生物种质资源是生命延续和种族繁衍的保证，是生物多样性保护的重要方面。种质资源保护是指搜集、整理、鉴定、保护、保存和合理利用种质资源。种质资源库是利用仪器设备控制贮藏条件，长期贮存生物种质的人工环境，能有效保护和保存种质资源，使种质资源在几十至近百年仍不丧失原有的遗传性。

9 水文化传承与水景观构建

9.2 水文化传承

9.2.1 水文化遗产资源分类见表 9。

表 9 水文化遗产资源分类

大类	中类		小类
物质形态	不可移动	水利工程遗产	灌溉工程遗产
			防洪工程遗产
			运河工程遗产
			给排水工程遗产
			园林水利遗产
			水土保持工程遗产

	非水利工程遗产	水力发电工程遗产
		与水有关的古文化遗址
		水利人物墓葬
		与水有关古建筑
		水利碑刻壁画
		与水有关近现代重要代表性建筑
	可移动	水利代表性实物
		水利文献
		水文化艺术和工艺品
		传统水利机具和水力机械
非物质形态	与水有关的社会风俗、礼仪、节庆	
	水利知识与实践	
	与水有关的传统手工技艺	
	与水有关的表演艺术	
	与水有关的口头传统与表达	

9.2.2 保护和修复区域内现存古堰、古闸、古渠、古井、古桥、古渡口、古代治水工具和古代治水人物庙宇、祠堂、匾额等历史文化遗产等，传承和展示古代水文化。

10 材料和施工

10.1 材料选择

10.1.1 河湖生态系统保护与修复工程建议合理采用块石、木材、滤材、植物纤维、植物枝条、铅丝石笼、石笼垫、混凝土构件等自然和人工材料，避免使用过多人工材料。植物配置要优先选择耐污、净化力强和养护管理简易的品种，并结合河道功能定位，充分考虑景观观赏性，选用外来种时需对入侵影响进行分析。所选用的水生植物根、茎、叶要发育良好，植株健壮，岸坡区域植物生长基材可选用水生土、泥炭土、蛭石、珍珠岩等材料。

10.1.2 生物浮床框体一般选用 PVC 管、不锈钢管、木材和毛竹等材料，浮床基质可采用海绵、椰子纤维等。

美国农业自然资源保护机构（NRCS）定义水生土为：在水分饱和状态下形成的，在生长季有足够的水淹时间使其上部能够形成厌氧条件的土壤。水生土分为矿质土壤和有机土壤两种，含有适宜的化学成分、大量养分和种子库，是湿地生态系统的重要生物资源。水生土处于生物、水体和气体的界面，在水分、营养物质、沉淀物、污染物、温室气体的运移过程中具有独特作用。水生土长期处于过湿状态，生物残体难以充分分解，使得土壤中积累了大量养分，尤其是泥炭土，其有机质养分含量很高。水生土长期处于水下或周期性洪水泛滥过程中，水体中的营养物质沉淀在土壤表层，增加了土壤肥力。所以说水生土也是储存和提供营养物质的营养库。多年形成的水生土，足以支持湿地植被和整个生态系统。一般来说，水生土中已经建立了湿地植物的种子库，成为湿地的重要生物资源。因此，恢复、重建或扩大湿地，都要充分利用当地的水生土。在为新建湿地选址时，要选择在水生土上构筑湿地；在原有湿地基础上扩大湿地时，宜用挖方的水生土构筑堤岸。

依据植物与水位关系，小微水体修复区域的植被可以选择如下类型：（1）湿生植物。其生长环境为大部分时间地表无积水，土壤处于饱和或过饱和状态，如垂柳、枫杨等；（2）挺水植物。植物根部没在水中，茎叶大部分挺于水面以上，如芦苇、菖蒲、荻等；（3）浮水植物。植物体漂浮在水面以上，其中一些植物的根部着生在水底沉积物中，如睡莲、萍蓬草等；（4）沉水植物。植物体完全没于水中，有些仅在花期将花伸出水面，如金鱼藻、黑藻等。（5）漂浮植物。植物体漂浮在水面，根部悬浮在水中，群居而生，随风浪漂移，如浮萍等。

10.1.3 在生态型护岸措施中，抛石和石笼所用石材要完整，遇水不易破碎和分解；天然柔性材料宜采用自然材料（如黄麻、椰子壳纤维垫）或合成纤维制成的织造或非织造土工布；充分利用原坡面开挖表土，并加入保水剂、肥料、中砂等掺合料。表土是指在土壤剖面中最靠近地表、有机质和微生物含量最多、对地力快速恢复和植物生长最有利的表层土壤，表土回填能增加主要有机质含量、改善营养状态和土壤的物理性质，尤其是土壤结构，还能够提高新生土壤的生物多样性，并通过引入有益的土壤微生物促进植物的生长以及本土植被群落的发育。表土临时堆存应采取临时措施防护。

10.1.4 构筑生态堰的材料包括：块石、卵石、原木、铅丝笼等。具有纹理和粗糙表面的块石和卵石，是无脊椎动物的理想避难所。块石或卵石砌筑物的设计，外观线条力求流畅，以提高景观美学价值。筑堰块石直径应满足抗冲要求，建议按

照启动条件计算块石直径（Costa, 1983）。

$$D_{min}=3.4V^{2.05} \quad (21)$$

式中： D_{min} ——块石的最小直径（cm）； V ——断面平均流速（m/s）。在工程应用中，建议按照 $D_{50}=2D_{min}$ 和 $D_{100}=1.5D_{50}$ 筛选筑堰材料。

如果当地溪流河床缺乏大粒径块石或卵石，可以选择铅丝笼构件。为弥补铅丝笼结构外观欠佳的缺点，可填充表土扦插植物，增加植物覆盖。原本是一种天然材料，既是生物栖息地，又能提供木屑残渣，经数量巨大的碎食者、收集者和各种真菌和细菌破碎、冲击后转化为细颗粒有机物，成为初级食肉动物的食物来源。一般在溪流上构筑堰时，采用原木材料。根据原木尺寸、水深、河宽等条件，可选择单根或多根原木组合。

河床底质粒径组成应从底层至上层由小到大顺序铺设，最下层粒径应接近原底质粒径 d_{50} ，表层大块漂石或卵石粒径不宜太大。

不同产卵类型鱼类对河床底质材料的需求如下：（1）产漂流性卵鱼类：喜砂、喜泥，河床底质以细沙砾混合型居多，由细沙、小型石砾砾石为主构成。（2）产粘性卵鱼类：喜砂、喜石，河床底质以沙砾混合型居多，由细沙、中小型砾石为主构成，其间混杂少量大砾石或块石。

10.1.5 结构材料包括竹、木、PVC、聚氨酯泡沫、钢筋、混凝土等，粘附基质材料包括蒲草、棕片、蕨类植物、柳树须根、金鱼藻、孤尾藻、尼龙网、塑料丝等。浮动式人工鱼巢的结构材料宜以竹杆、圆木等为主，基质材料宜采用活体植物或天然材料。鱼礁式人工鱼巢的选材应无污染、易加工制造、资源丰富，在加工、搬运、组装、放置、投放时不易破损，并抗水流、波浪冲刷，具有耐久性。

10.2 工程施工

10.2.1 在河道内进行施工时，需根据该河段在鱼类完成生活史过程中所发挥的主要功能，避开鱼类生活史的敏感时段。

10.2.2 生态清淤工程目的是清除悬浮状与流动状的淤泥，同时施工中尽可能减少污泥扩散对周围水体的污染，减少施工对水体的扰动。施工设备须满足精确疏浚的要求，满足对细颗粒流泥的清除要求，满足低扰动疏浚的要求，满足疏浚技术经济的要求。挖泥船作业时，要避免妨碍运输船舶航行，注意安全操作和设施的齐备。在现场要标定挖槽的准确位置，布设水位讯号、挖泥和卸泥区标志，经常进行水深测量，提高挖泥船运转效率。

不同生态清淤设备的施工方法和施工工艺：

（1）对于环保绞吸式挖泥船，当挖槽长度大于挖泥船浮筒管线有效伸展长度时要分段施工；当挖泥厚度大于绞刀一次最大挖泥厚度时要分层施工；当挖槽宽度大于挖泥船一次最大挖宽时要分条施工。选用环保绞吸式挖泥船施工时，其主要施工工艺流程根据输送距离长短分为两种：① 短距离输送：挖泥船挖泥→排泥管道输送→泥浆进入堆场→泥浆沉淀→余水处理→余水排放；② 长距离输送：挖泥船挖泥→排泥管道输送→接力泵输送→排泥管道输送→泥浆进入堆场→泥浆沉淀→余水处理→余水排放。

（2）对于环保斗式挖泥船，当挖槽长度大于挖泥船抛一次主锚所能提供的最大挖泥长度时要分段施工；当挖泥厚度大于泥斗一次有效挖泥厚度时要分层施工；当挖槽宽度大于挖泥船一次最大挖宽时要分条施工。选用环保斗式挖泥船施工时，其主要施工工艺流程根据输送方式分为两种：① 陆上输送：挖泥船挖泥→泥驳运输→污泥卸驳上岸→封闭自卸汽车运送→污泥倒入堆场或二次利用；

② 水上输送：挖泥船挖泥→泥驳运输→泥驳卸驳→堆场存放。

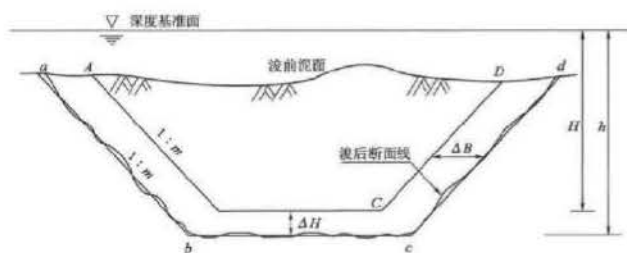
生态清淤工程方案设计要点：

(1) 根据底泥柱状样的分层结果确定有效清淤深度，实施生态清淤工程时，要先疏挖完上层流动浮泥后再疏挖下层污染底泥。对于近岸水域部分，为保护岸坡稳定，可采用吸泥方式施工。

(2) 依据拟疏挖区的水深测量图和水下钻孔资料揭示的污染层厚度、过渡层厚度，绘制污染层和过渡层底板等值线。污染层底板等值线是区分不同挖泥底高程清淤作业分区的主要依据，过渡层底板等值线是辅助依据。

(3) 在污染层和过渡层底板等值线基础上，按照尽可能清除污染底泥的原则，在满足挖泥船施工可操作性的条件下，对拟疏浚区进行分区，并确定设计挖泥底高程。考虑到疏挖区周边护岸的稳定性和生态恢复的需要，将距护岸一定范围内设计成近岸区，视其土质、污染特点、护岸安全和生态修复要求采用特殊工艺清除污染底泥。

(4) 水下清淤作业存在水平和垂向偏差，为保证能够按设计断面（见图8）将污染底泥彻底清除，在工程上允许挖泥船施工时有一定的超深和超宽量。根据交通部现行疏浚施工规范，当绞吸挖泥船装机总功率 ≥ 5000 kW时，允许超深值取0.4 m，允许超宽值取4.0 m；当装机总功率 < 5000 kW时，允许超深值取0.3 m，允许超宽值取3.0 m。考虑到环保疏浚使用的挖泥船定位、定深精度较高，生态清淤工程定位精度可控制在20 cm以内，挖泥深度精度可控制在15 cm以内。



ABCD——设计断面；a,b,c,d——工程量计算断面； ΔB ——计算超宽； ΔH ——计算超深；1:m——设计坡比；H——设计深度；h——计算深度。

图 8 生态清淤工程量计算断面示意图

11 监测和管理

11.1 河湖生态监测

11.1.3 生态监测指标体系可采用 SL 709 相关指标。可利用卫星遥感、无人机、地理信息系统、全球定位系统、计算机辅助决策支持系统、人工智能、远程控制等技术，对各类监测信息进行实时监测、传输和管理，形成河流生态系统实时监测网络体系。

11.1.4 根据效果评估要求制定监测方案，持续开展水文情势和生物群落响应的监测与研究，并据此对生态调度、生态流量泄放过程等进行动态调整。监测要素一般包括水位、流量、水温、水质、鱼类资源、亲鱼成熟度、卵苗径流量等。

监测断面在现有监测系统基础上合理新增。监测时段与现有监测系统的监测时段和时限合理衔接，并适当延长生态调度前后监测时段。水电工程和闸坝工程开展3~5年的试验性生态调度监测评估，并根据评估结果优化生态调度规则。

主要控制断面的类型不同，生态流量监测措施要求也存在差异。如对尚未开展生态流量监测的水利水电工程断面，应结合生态流量泄放设施，提出生态流量在线监控设施建设要求；对已布设水文站点但监测内容和方式无法满足要求的，可提出水文站点优化升级、补充平枯水流量监测、提高小流量监测精度等措施要求。

11.1.7 对于迁入替代生境的物种应持续监测，掌握物种生存与繁衍情况。

11.2 后评估

11.2.1 后评估包括工程施工前后对照评估、工程实施目标实现程度评估和趋势分析评估三部分。根据后评估的结果，对工程设计方案、管理措施等进行负反馈式调整，确保工程达到良好效果。通过工程施工前后的对照，重点分析物理化学、水文、地貌、水力、生物以及社会经济等方面的变化情况；通过与工程实施目标的对照，分析工程实施后是否达到了预定目标；通过趋势分析，分析预测各生境因子与生物的演变趋势，从而判断生态系统是否向健康方向发展。进行后评估时，现状评价阶段所采用的河湖生态状况分级系统可对照使用。

11.2.2 分析对比恢复连通性前后的变化、对比历史自然状况分析连通性恢复程度，从而对恢复连通性的效果做出定量评价。

11.2.3 鱼类早期资源评估内容包括卵苗数量、卵苗发育期、卵苗径流量等，鱼类繁殖群体评估内容包括群体年龄结构、雌雄性比、成熟亲鱼比例等。

11.2.4 过鱼设施效果评估内容包括集鱼效率、通过效率、过鱼种类、群体遗传多样性等。

11.2.5 增殖放流效果评估内容包括放流种类的标志回捕率、资源密度、群体结构、遗传多样性、摄食状况及迁徙规律等。

11.3 河湖生态综合管理

11.3.2 河湖生态保护与修复工程设计工作需按照“设计-执行(管理)-监测-评估-调整”的流程以负反馈调节方式进行。评估的结果有如下可能：①系统基本按照预定目标发展，无需调整；②需要局部调整设计或管理要求，适应新的状况；③原来制定的目标需要调整，从而调整设计和管理要求。11.3.4 充分发挥遥感卫星解译、无人机识别、区域水网水质水量联合调度平台等信息技术优势，提高河湖水系综合管理能力。

11.3.5 河湖水系具有自然、社会和经济属性，其生态保护与修复是一项庞大的系统工程，其科学原理涉及生态水文学、生态水力学、生态水工学、环境工程学、景观生态学、生物学、地貌学、社会学、管理学和经济学等众多学科。