

附件 2

生态环境损害鉴定评估技术指南
地表水与沉积物
(征求意见稿)

Technical guidelines for identification and assessment of
eco-environmental damage
Surface Water and Sediments

2019 年 11 月

目 录

前 言	1
1 适用范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	5
4 工作程序	8
5 鉴定评估准备	10
6 地表水与沉积物损害调查确认	14
7 地表水与沉积物损害因果关系分析	33
8 地表水与沉积物损害实物量化	39
9 地表水与沉积物损害恢复	44
10 地表水与沉积物恢复效果评估	52
11 报告编制	54
附录 A	56
推荐性引用附录 A	63
推荐性引用附录 B	69
推荐性引用附录 C	78
推荐性引用附录 D	95
推荐性引用附录 E	98
推荐性引用附录 F	111

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》，保护地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能，保障公众健康，规范地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估工作，为环境管理与环境司法提供技术依据，制定本指南。

本指南规定了地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估的内容、程序和技术要求。

本指南为指导性文件。

本指南为首次发布。

本指南由生态环境部法规与标准司组织制订并解释。

本指南主要起草单位：生态环境部环境规划院、中国科学院生态环境研究中心、中国水利水电科学研究院。

生态环境损害鉴定评估技术指南 地表水与沉积物

1 适用范围

本指南适用于因环境污染或生态破坏导致的地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估，规定了地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估的内容、工作程序、方法和报告编写要求等内容。

本指南不适用于核与辐射事故导致的地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估工作。

2 规范性引用文件

本指南引用了下列规范性文件中的部分条款或内容。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本指南。不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

GB/T 50594	水功能区划分标准
GB 3838	地表水环境质量标准
GB 5084	农田灌溉水质标准
GB 11607	渔业水质标准
GB 8978	污水综合排放标准
GB 15618	土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
GB 36600	土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管

控标准（试行）

GB/T 14848	地下水质量标准
GB/T 22234	基于 GHS 的化学品标签规范
GB 13690	化学品分类和危害性公示 通则
CJ/T 206	城市供水水质标准
HJ/T 91	地表水和污水监测技术规范
HJ/T 164	地下水环境监测技术规范
NY/T 396	农田水源环境质量监测技术
HJ 710.7	生物多样性观测技术导则 内陆水域鱼类
HJ 710.4	生物多样性观测技术导则 鸟类
HJ 710.6	生物多样性观测技术导则 两栖动物
HJ 710.12	生物多样性观测技术导则 水生维管植物
HJ 710.8	生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型 无脊椎动物
HY/T 078	海洋生物质量监测技术规程
HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
HJ 194	环境空气质量手工监测技术规范
HJ 589	突发环境事件应急监测技术规范
HJ 494	水质 采样技术指导
HJ 495	水质 采样方案设计技术指导
HJ 493	水质采样 样品的保存和管理技术规定

- HJ 168 环境监测 分析方法标准制修订技术导则
- HJ 630 环境监测质量管理技术导则
- GB/T 14551 生物质量 六六六和滴滴涕的测定 气相色谱法
- GB/T 5009 食品卫生检验方法理化标准系列
- HJ 831 淡水水生生物水质基准制定技术指南
- HJ 837 人体健康水质基准制定技术指南
- HJ 838 湖泊营养物基准制定技术指南
- GB/T 21678 渔业污染事故经济损失计算方法
- SL 563 水库鱼产力评价标准
- SC/T 9401 水生生物增殖放流技术规程
- GB 50707 河道整治设计规范
- HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
- GB/T 25173 水域纳污能力计算规程
- LY/T 2735 自然资源（森林）资产评价技术规范
- LY/T 2899 湿地生态系统服务规范
- 《国家重点保护野生动物名录》（林业部、农业部令第 1 号）
- 《〈濒危野生动植物种国际贸易公约〉附录水生动物物种核准为国家重点保护野生动物名录》（农业农村部公告第 69 号）
- 《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲》（环办政法〔2016〕67 号）

《生态环境损害鉴定评估技术指南 损害调查》（环办政法〔2016〕67号）

《环境损害鉴定评估推荐方法（第II版）》（环办〔2014〕90号）

《生态环境损害鉴定评估技术指南 土壤与地下水》（环办法规〔2018〕46号）

《突发环境事件应急处置阶段环境损害评估推荐方法》（环发〔2014〕118号）

《关于虚拟治理成本法适用情形与计算方法的说明》（环办政法函〔2017〕1488号）

《污染死鱼调查方法（淡水）》（农渔函〔1996〕62号）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

3.1 地表水 **Surface Water**

指存在于陆地表面各种形态的水体，主要包括各种河流（包括运河、渠道）、湖泊和水库，根据地表水管理现状，还包括淡水河口。

3.2 沉积物 **Sediment**

指可以由水体携带、并最终沉着在水体底部，形成底泥状的任何物质。通常是黏土、泥沙、有机质及各种矿物的混合物，经

过长时间物理、化学及生物等作用及水体传输而沉积于水体底部所形成。

3.3 水功能区 Water function zone

指为满足水资源合理开发、利用、节约和保护的需求，根据水源的自然条件和开发利用现状，按照综合规划、水资源保护和经济社会发展要求，依其主导功能划定范围并执行相应水环境质量标准的水域。

3.4 水生态环境事件 Water eco-environmental incidents

指由于人类活动或各类突发事件引起污染物进入水环境，或由于过度捕捞、非法采砂、工程建设、侵占围垦、物种入侵等生态破坏活动，造成水体生态环境质量下降，导致水生态系统服务功能减弱或丧失的事件。根据事件原因的不同，包括水环境污染事件和水生态破坏事件。

3.5 水生态环境损害 Water eco-environmental damage

指因污染环境、破坏生态造成地表水、沉积物等环境要素和水生生物等生物要素的不利改变，及上述要素构成的水生态系统功能退化和服务减少。

3.6 水生态环境损害鉴定 Identification for water eco-environmental damage

指按照规定的程序和方法，综合运用科学技术和专业知识，调查污染环境、破坏生态行为与水生态环境损害情况，分析污染

环境或破坏生态行为与水生态环境损害间的因果关系，确定水生态环境损害类型、原因及损害量。

3.7 水生态环境损害评估 Assessment for water eco-environmental damage

指对污染环境或破坏生态行为所致水生态环境损害的范围和程度进行评估，确定受损水生态环境恢复至基线并补偿期间损害的恢复措施，量化水生态环境损害数额的过程。

3.8 水生生态系统服务功能 Water ecosystem service

指人类从水生生态系统中获得的收益，包括供给服务功能、调节服务功能、文化服务功能以及支持服务功能。

3.9 水生态环境基线 Baseline of water eco-environment

指污染环境、破坏生态行为未发生时，评估区域内水生态环境质量及水生生态系统服务功能的状态。

3.10 调查区 Survey area

指为确定地表水与沉积物生态环境损害的类型、范围和程度，需要开展勘查、监测、观测、观察、调查、测量的区域，包括水生态环境事件可能的影响区域、损害发生区域和对照区，以及可能造成水环境污染事件的污染源所在区域。

3.11 评估区 Assessment area

指经调查发现发生地表水与沉积物环境质量和水生生态系统服务功能退化，需要开展生态环境损害识别、分析与确认的区域。

3.12 二次污染 Secondary pollution

指污染物由污染源排入地表水环境后或在应急处置过程中通过投加药剂与原有污染物，在物理、化学、生物作用下生成新的污染物，对地表水和沉积物环境产生再次污染的过程。

3.13 特征污染物 Particular pollutant

指水环境污染事件中向水体直接排放或通过二次污染产生可能导致潜在污染或对周边环境保护目标产生影响的主要污染物。

4 工作程序

地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估工作程序包括：

4.1 鉴定评估准备

掌握地表水与沉积物的生态环境损害的基本情况和主要特征，确定生态环境损害鉴定评估的内容、范围和方法，编制鉴定评估工作方案。

4.2 损害调查确认

通过开展地表水与沉积物污染状况调查以及水生生态系统服务功能调查，确定地表水与沉积物环境质量及水生生态系统服务功能的基线水平，判断地表水与沉积物环境及水生生态系统服务功能是否受到损害。

4.3 因果关系分析

基于损害调查结果,分析污染环境行为或破坏生态行为和地表水与沉积物环境及水生生物、水生态系统、水生态系统服务功能损害之间是否存在因果关系。

4.4 地表水与沉积物损害实物量化

筛选确定地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能损害的评估指标,对比相关指标的现状与基线水平,确定地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能损害的范围和程度,计算地表水与沉积物生态环境损害实物量。

4.5 地表水与沉积物损害恢复或价值量化

基于等值原则,编制并比选生态环境恢复方案,量化地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能的损失。

4.6 地表水与沉积物损害鉴定评估报告编制

编制地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估报告(意见书),同时建立完整的鉴定评估工作档案。

4.7 地表水与沉积物恢复效果评估

定期跟踪地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能的恢复情况,全面评估恢复效果是否达到预期目标;如果未达到预期目标,应进一步采取相应措施,直到达到预期目标。

地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估程序见图 1。

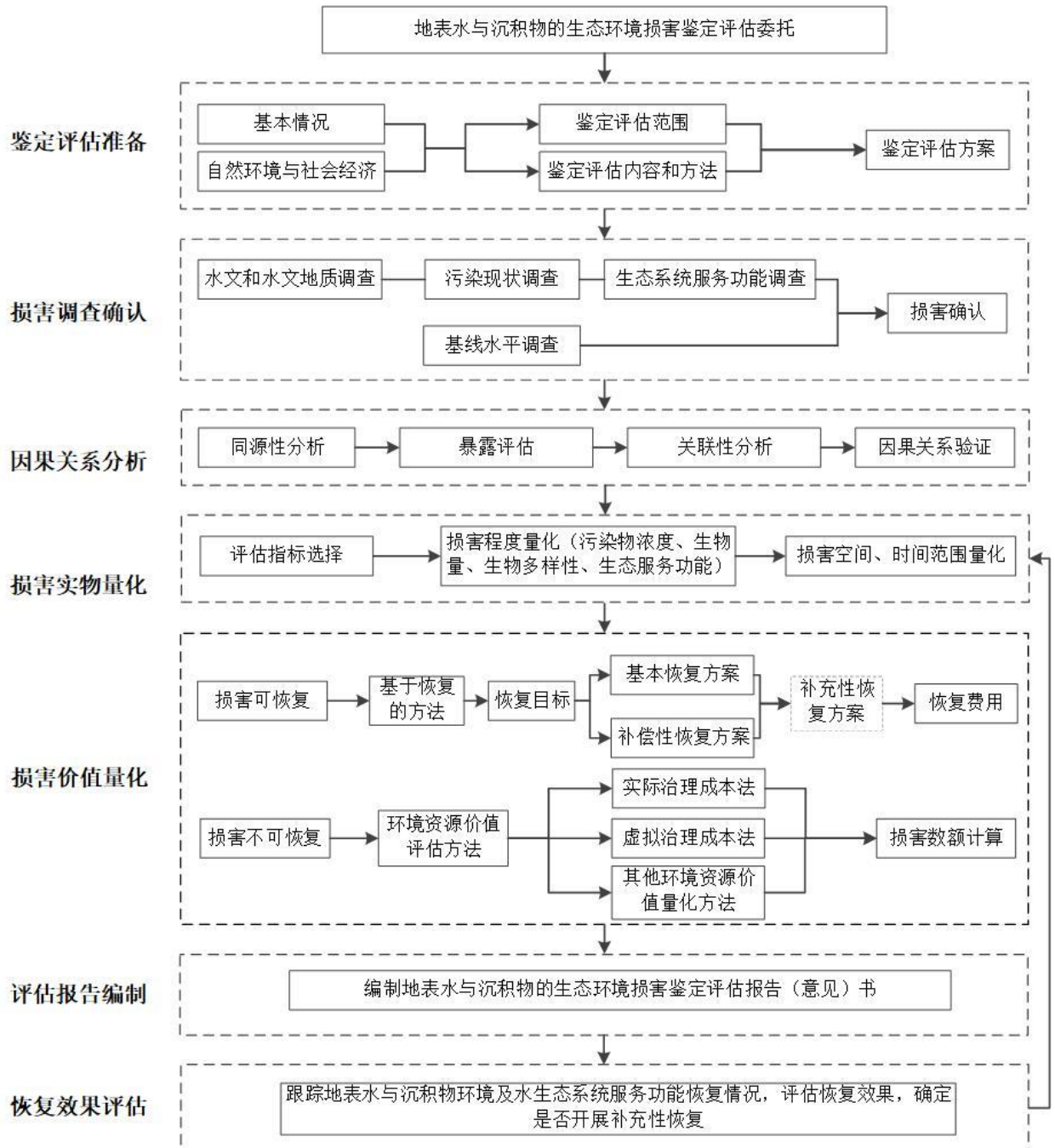


图 1 鉴定评估程序

5 鉴定评估准备

通过资料收集分析、文献查阅、座谈走访、问卷调查、现场踏勘、现场快速检测等方式，掌握地表水与沉积物的生态环境损害的基本情况，了解评估区的自然环境与社会状况，分析地表水

与沉积物可能的受损范围，明确地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估工作的主要内容，研究确定每一步评估工作要采用的具体方法，编制鉴定评估工作方案。

5.1 基本情况调查

5.1.1 污染环境或破坏生态行为调查

对于水环境污染事件，了解水域及周边区域排污单位、纳污沟渠及农业面源等污染分布情况，分析或查明污染来源；对于突发水环境污染事件，还应查明事件发生的时间、地点，可能产生污染物的类型和性质、排放量（体积、质量），污染物浓度等资料和情况。

对于水生态破坏事件，查明破坏生态行为发生的地点、位置、时间、频次等情况。

5.1.2 污染源调查

涉及排污单位的，应调查生产及污染处理工艺，包括主要产品、设计产量及实际产量；所使用的主要材料的来源、使用量、运输及储存方式；主要产污节点及特征污染物；污染处理的工艺；污染处理设施的运行状况等。调取排污单位环境影响评价、清洁生产、环境管理体系认证资料等相关技术和审批文件，历史相关监测数据等资料。

对于排放污水的，应调查污水排放来源，点源应该标明监测点位名称、排放口的属性（总外排口、车间排口）、平面位置、

排放方向、排放流量；非点源应该标明排放方式、去向（有组织汇集、无组织漫流等）；调查外排废水中的主要污染物、排放规律（稳定连续排放、周期性连续排放、不规律连续排放、有规律间断排放、不规律间断排放等）、排水去向、排放量、污水处理工艺及处理设施运行情况；GB 8978 规定的第一类污染物是否在车间有处理设施或专门另设了污染物处理设施等。

对于产生固体废弃物的，调查固体废物种类、形态、数量、特性、所含主要污染物，是否属于危险废物；固体废物产生时间、产生形式，贮存及处置方式（露天堆存、专用危险废物库内堆存、渣棚内堆存）；固体废物去向；尾矿库情况；防扬散、防雨、防洪、防渗漏、防流失等污染防治措施。

5.1.3 环境污染或生态破坏基本情况调查

掌握受污染或破坏水生态系统的自然环境（包括水文、水文地质、水环境质量）、水生生物和服务功能受损害的时间、方式、过程和影响范围等信息。

对于水环境污染事件，了解污染物排放方式、排放时间、排放频率、排放去向，特征污染物类别、浓度；污染源排放的污染物进入地表水和沉积物环境生成的次生污染物种类、数量和浓度等信息。

5.1.4 事件应对基本情况调查

了解污染物清理、防止污染扩散等控制措施，地表水与沉积物环境治理修复以及水生生态系统恢复实施的相关资料 and 情况，包括实施过程、实施效果、费用等相关信息。

掌握环境质量与水生生物监测工作开展情况及监测数据。

5.2 自然环境与水功能信息收集

调查收集影响水域以及水域所在区域的自然环境信息，具体包括：

- a) 水域历史、现状和规划功能资料；
- b) 水域地形地貌、水文以及所在区域气候气象资料；
- c) 水域及其所在区域的地质和水文地质资料；
- d) 地表水与沉积物历史监测资料；
- e) 影响水域内饮用水源地、生态保护红线、自然保护区、湿地、风景名胜区及所在区域内养殖区、基本农田、居民区等环境敏感区分布信息，以及浮游生物、底栖动物、大型水生植物、鱼类、水禽、哺乳动物及河岸植被等主要生物资源的分布状况。

5.3 社会经济信息收集

收集影响水域所在区域的社会经济信息，具体包括：

- a) 经济和主要产业的现状和发展状况；
- b) 地方法规、政策与标准等相关信息；
- c) 人口、交通、基础设施、能源和水资源供给等相关信息。

5.4 工作方案制定

根据所掌握的监测数据、损害情况以及自然环境和社会经济信息，初步判断地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能可能的受损范围与类型，必要时利用实际监测数据进行污染物与水生生物损害空间分布模拟。

根据事件的基本情况和鉴定评估需求，明确要开展的损害鉴定评估工作内容，设计工作程序，通过调研、专项研究、专家咨询等方式，确定鉴定评估工作的具体方法，编制工作方案。

6 地表水与沉积物损害调查确认

按照评估工作方案的要求，参照 HJ/T 91、HJ 493、HJ 494、HJ 495、HJ 589 等相关规范性文件，针对事件特征开展地表水与沉积物布点采样分析，确定地表水与沉积物环境状况，并对水生态系统服务功能、水生生物种类与数量开展调查；必要时收集水文和水文地质资料，掌握流量、流速、河道湖泊地形及地貌、沉积物厚度、地表水与地下水连通循环等关键信息。同时，通过历史数据查询、对照区调查、标准比选等方式，确定地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能的基线水平，通过对比确认地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能是否受到损害。

6.1 确定调查对象与范围

6.1.1 水生态系统服务功能调查

获取调查区域水资源使用历史、现状和规划信息，查明地表水与沉积物损害发生前、损害期间、恢复期间评估区的主要生态

系统功能与服务类型，如珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼索饵场、鱼虾类越冬场和洄游通道、种质资源保护区、航道运输等支持服务功能，洪水调蓄、侵蚀控制、净化水质等调节服务功能，集中式饮用水源用水、水产养殖用水、农业灌溉用水、工业生产用水等供给服务功能，人体非直接接触景观功能用水、一般景观用水、游泳等休闲娱乐等文化服务功能。

6.1.2 不同类型事件的调查重点

根据事件概况、受影响水域及其周边环境的相关信息，确定调查对象与范围。

对于突发水环境污染事件，主要通过现场调查、应急监测、模型模拟等方法，重点调查研判污染源、污染物性质、可能涉及的环境介质、受水文和水文地质环境以及事件应急处置影响污染物可能的扩散分布范围和二次污染物、污染物在水体中的迁移转化行为、水生态系统服务功能和水生生物受损程度和时空范围。

对于累积水环境污染事件，主要通过实际环境监测和生物观测等方法，重点调查污染源、污染物性质、可能涉及的环境介质、污染物的扩散分布范围、污染物在水体、沉积物、生物体中的迁移转化行为及其可能产生的二次污染物、水生态系统服务功能和水生生物受损程度和时空范围。

对于水生态类事件，主要通过实际调查、生物观测、模型模拟等方法，重点调查水生态系统服务功能和水生生物受损程度和

时空范围、水生态破坏行为可能造成的二次污染及其对水环境与水生生态系统服务功能和水生生物的影响。

6.2 确定调查指标

根据水生态环境事件的类型与特点，选择相关指标进行调查、监测与评估，见表 6-1。

表 6-1 不同类型水生态环境事件调查指标

事件类型	环境质量		水生态系统服务功能																
	污染物浓度		产品供给				支持服务						调节服务				文化服务		
			水产品生产		水资源供给	生物多样性维护			地形地貌	航运支持	洪水调蓄	水质净化	气候调节	土壤保持	休闲娱乐	景观科研			
地表水	沉积物	生物体污染物残留浓度	种类	数量	水量	生物体污染物残留浓度	种类	致畸致死数量	数量	栖息地面积		运量	调蓄量	净化量	蒸散量	保持量			
突发水环境污染事件	++	+	+	+	+	++	+	+	+	+	+		+					+	+
累积水环境污染事件	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++							+	+
过度捕捞				++	++			++	++									+	+
非法采砂	+	+		+	+			+	+	+	+	++		+			+	+	+
侵占围垦	+	+		+	+	++		++		++	++	+	+	+	+	+	+	+	+

事件类型	环境质量		水生态系统服务功能																
	污染物浓度		产品供给				支持服务						调节服务				文化服务		
			水产品生产		水资源供给	生物多样性维护			地形地貌	航运支持	洪水调蓄	水质净化	气候调节	土壤保持	休闲娱乐	景观科研			
	地表水	沉积物	生物体污染物残留浓度	种类	数量	水量	生物体污染物残留浓度	种类	致畸致死数量	数量	栖息地面积	运量	调蓄量	净化量	蒸散量	保持量			
工程建设	+	+		+	+	+		++		++	++	+	+	+	+	+		++	++
物种入侵				++	++			++		++	++								

注：+表示需要调查，++表示需要重点调查。

6.2.1 特征污染物的筛选

对于污染源明确的情况，参考行业排放标准，通过现场踏勘、资料收集和人员访谈，根据排污企业的生产工艺、使用原料助剂，以及物质在地表水与沉积物迁移转化中发生物理、化学变化或者与生物相互作用可能产生的二次污染物，综合分析识别特征污染物。

对于污染源不明的情况，通过对采集样品的定性和定量化学分析，识别特征污染物。

特征污染物的筛选应优先选择我国相关水环境质量标准（GB 3838、GB 5084、GB 11607），以及有毒有害水污染物名录中规定的物质。对于检测到的相关标准中没有的物质，应通过查询国外相关法规标准、开放数据库、研究成果，根据化学物质的理化性质、易腐蚀性、环境持久性、生物累积性、急慢性毒性和致癌性等特点，筛选识别特征污染物。必要时结合相关实验测试，评估其危害，确定是否作为特征污染物。化学物质的危害性分类方法参考 GB/T 22234 和 GB 13690。所依据的化学物质的毒性数据质量需符合 HJ 831 相关筛选原则。

水环境污染事件涉及的常见特征污染物主要包括：

- （1）无机污染物：重金属、酸碱、无机盐等；
- （2）有机污染物：油类、脂肪烃、苯系物、溶剂、有机酸、醇醛酮、酚类、酯类等；

(3) 富营养化特征指标：总磷、总氮、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、藻华、异味物质等。

可能影响污染物对地表水和沉积物环境及水生生物潜在损害的监测指标主要包括：

(1) 物理指标：温度、流速、深度、其他与流动变化有关的水文指标；

(2) 水质指标：pH、硬度、溶解氧、浊度、COD、病原微生物等。

6.2.2 水文与水文地质指标的确定

对于河流类水体，重点关注事件发生的河流流域水系、流域边界、河流断面形状、河流断面收缩系数、河流断面扩散系数、河床糙率、降雨量、蒸发量、河川径流量、河底比降、河流弯曲率、流速、流量、水温、泥沙含量、本底水质、地表水与地下水补给关系、河床沉积结构等指标。

对于湖库类水体，重点关注湖泊形状、水温、水深、盐度、湖底地形、出入湖（库）流量、湖流的流向和流速、环流的流向、流速、稳定时间，湖（库）所在流域气象数据，如风场、气温、蒸发、降雨、湿度、太阳辐射、地表水与地下水补给关系、湖库底层及侧壁地层岩性、导水裂隙分布等指标。

6.2.3 水生生物指标的确定

根据水生态环境事件类型和影响水域实际情况，选择代表性强、操作性好的水生生物指标开展监测。

石油类、毒性有机物、重金属等污染物导致的水环境污染事件的水生生物调查指标包括生物种类、数量或生物量、形态和水生生物组织中特征污染物的残留浓度。酸碱、氮、磷等污染物和有机质、溶解氧、热能等指标变化导致的水环境污染事件的水生生物调查指标包括生物种类、数量或生物量。

浮游生物调查指标包括种类组成、生物量；底栖动物调查指标包括种类组成、数量和生物量；鱼类及其它大型水生生物调查指标包括种类组成、数量和生物量等；水禽调查指标包括种类组成和数量。重点关注国家重点保护野生水生动物和鸟类相关物种，参阅推荐性引用附录 A。

6.2.4 水生态系统服务功能指标的确定

对水生态系统支持服务功能改变的，调查监测指标主要包括生物种类、数量和生物量、栖息地面积、航运量、水文和水文地质参数，重点关注保护物种、濒危物种；对水生态系统生产服务功能改变的，调查指标主要包括水资源量、水产品产量和种类；导致水生态系统调节服务功能改变的，调查评估指标主要包括洪水调蓄量、降温量、蒸散量、水质净化量、土壤保持量；对水生态系统文化服务功能改变的，调查评估指标主要包括休闲娱乐人次和水平、旅游人次和服务水平。

6.3 水文和水文地质调查

6.3.1 调查目的

水文和水文地质调查的目的在于了解调查区地表水的流速、流量、水下地形地貌、流域范围、水深、水温、气象要素、地层沉积结构、与周边水体水力联系等信息，获取污染物在环境介质中的扩散条件，判断事件可能的影响范围，污染物在地表水和沉积物中的迁移情况、采砂等活动对水文水力特性、地形地貌的改变情况，为地表水与沉积物污染状况调查分析提供技术参数，为水生态系统服务功能受损情况的量化提供依据。

6.3.2 调查原则与方法

a) 充分利用现有资料。根据现有资料对调查区水文信息进行初步提取，重点关注已有水文站建档资料，以初步识别污染物在地表水与沉积物中迁移所需的水文学、水力学参数。现有资料不足时，开展进一步调查。

b) 兼顾所在区域和评估水域水文学、水力学参数展开调查。以评估水域为重点调查区，获得评估水域水文学、水力学资料。根据区域资料初步判断水文学、水力学信息，区域资料不能满足评估精度时，开展相应的水文测验、水力学试验获取相关参数。

6.4 布点采样

6.4.1 布点采样要求

以掌握环境损害发生流域（水系）状况、反映发生区域的污染状况或生态影响的程度和范围为目的，根据水系流向、流量、流速等水文特征、地形特征和污染物性质等情况，结合相关规范和指南的要求，合理设置监测断面或采样点位。一般在事件发生地点上游且未受干扰的区域设置对照断面（可在水系入境断面设置对照断面）。依据水生态系统服务功能和事件发生地的实际情况，尽可能以最少的监测断面（点）和采样频次获取足够有代表性的信息，同时考虑采样的可行性。

对于突发水环境污染事件，根据实际情况和 HJ 589 的要求进行布点采样。初步调查和系统调查可以同步开展，系统调查采样应不晚于初步调查 24h 开展。事件刚发生时，采样频次可适当增加，待摸清污染物变化规律后，可以减少采样频次。

对于累积水环境污染事件，根据流向和污染情况进行地表水和沉积物布点采样；应在地表水体和沉积物污染区域等间距布设监测断面或采样点位，并在死水区、回水区、排污口处等疑似污染较重区域布点；对河流的监测断面布点应在损害发生区域及其下游加密布点采样，对湖（库）的监测垂线布设以损害发生地点为中心，按水流波动方向以一定的间隔扇形或圆形布点采样。

对于水生态破坏事件，根据实际情况和相关技术导则进行水体、沉积物和水生生物布点采样。

采样时应准确记录采样点的空间位置信息；采样结束前，应核对采样方案、记录和样品，如有错误和遗漏，应立即补采或重采。

6.4.2 调查采样准备

开展水生态环境事件现场调查，应准备的材料和设备主要包括：记录设备，录音笔、照相机、摄像机和文具等；定位设备，卷尺、卫星定位仪、经纬仪和水准仪等；采样设备，现场便携式检测设备，调查信息记录装备，地表水、沉积物、生物等取样设备，样品保存装置；安全防护用品，工作服、工作鞋、安全帽、药品箱等。

采样前，应采用卷尺、卫星定位仪、经纬仪和水准仪等工具在现场确定采样点的具体位置和地面标高，并在图中标出。

6.4.3 初步调查采样

初步调查采样的目的是通过现场定点监测和动态监测，进行定性、半定量及定量分析，初步判断污染物类型和浓度、污染范围、水生态系统服务功能变化和水生生物受损情况，为研判污染趋势、进一步优化布点、精确监测奠定基础。

初步调查阶段，对于污染物监测以色味观测、现场快速检测为主，实验室分析为辅，可根据实际情况选择现场或实验室分析方法，或两者同时开展。根据污染物的特性及其在不同环境要素中的迁移转化特点，对于易挥发、易分解、易迁移转化的污染物

应采用现场快速监测手段进行监测。按环境要素，监测的紧迫程度通常为地表水>沉积物>生物。进行样品快速检测的同时保存不低于 20% 比例的样品，以备复查。

对于污染团明显的难溶性污染物，可以结合遥感图、影像图进行辅助判断。

按污染物的理化性质和结构特征分类，尽可能采用能涵盖多指标同类污染物的高通量快速监测分析方法。

6.4.4 系统调查采样

系统调查阶段的目的是通过开展系统的布点采样和定量分析，确定污染物类型和浓度、污染范围、水生生物受损程度，为损害确认提供依据。

6.4.4.1 污染源布点采样

根据排污单位的现场具体情况，对产生污染物的污染源排污口布点，对污染物进入地表水体的重污染区域布点。

a) 污染物进入水体前，对污染源排口进行采样，生产周期在 8h 以内，采样时间间隔应不小于 2h；生产周期大于 8h，采样时间间隔应不小于 4h；每个生产周期内采样频次应不少于 3 次；如没明显生产周期、不稳定连续生产，采样时间间隔应不小于 4h，每个生产日内采样频次应不少于 3 次。

b) 污染物进入水体后，应在刚进入水体的重污染区域布设采样断面。一般可溶性污染物，当水深大于 1m 时，应在表层下

1/4 深度处采样；水深小于或等于 1m 时，在水深的 1/2 处采样；不溶性轻质污染物，应在水体表层采样；不溶性重质污染物，应在水体底层采样。

6.4.4.2 地表水布点采样

对于河流，根据污染物排放、泄漏、倾倒的位置，沿河流流向在下游（控制断面）设置监测断面（点），并在上游布设对照断面（点）。采样断面位置尽量选择顺直河段、河床稳定、水流平稳、水面宽阔、无急流、无浅滩处。监测断面尽量与水文观测断面一致，以便利用其水文参数，实现水质监测与水文监测的结合。如河流的流速很小或基本静止，可根据污染物的特性在不同水层采样；在影响区域内饮用水和农灌区取水口处必须设置采样断面（点）。

对于湖（库），可确定污染范围的事件，应以事件发生地点为中心，按水流方向以一定间隔扇形或圆形布设监测垂线采样点，并根据污染物的特性在不同水层采样，同时根据水流流向，在其上游或未受影响区域适当距离布设对照点。无法确定污染范围的事件，采样点应布设在湖库区的不同水域，如进水区、出水区、深水区、浅水区、湖心区、岸边区，按水体类别设置监测垂线。湖库区若无明显功能区别，可用网络法均匀设置监测垂线。必要时，在湖（库）出水口和饮用水取水口处设置采样断面（点）。

监测垂线上采样点的布设一般与河流的规定相同，但有可能出现温度分层现象时，应作水温、溶解氧的探索性试验后再确定。

河流、湖（库）布点采样具体要求参照 HJ/T 91、HJ 495 等相关技术规范执行。

6.4.4.3 沉积物布点采样

沉积物样品的检测主要用于了解水体中易沉降、难降解污染物的累积情况，为确定沉积物中污染物的沉积时间，应该分层采样，模拟了解污染物沉积过程。沉积物采样点位通常为水质采样垂线的正下方。当正下方无法采样时，可略作移动，移动的情况应在采样记录表上详细注明；沉积物采样点应避开河床冲刷、底质沉积不稳定及水草茂盛、表层底质易受搅动之处；湖（库）沉积物采样点一般应设在主要河流及污染源排放口与湖（库）水混合均匀处。

河流、湖（库）沉积物采样布点位置和数量可以参考地表水体布点方案确定，为确定沉积物损害面积或方量，可以根据沉积物模型的需求确定。

6.4.4.4 生物布点采样

在水生态环境事件影响范围内，考虑水体面积、水功能区、水生生物空间和时间分布特点和调查目的，采用空间平衡随机布点法布置采样点或沿生物、生态系统受损害梯度布置采样点。

a) 对于湖（库）水生生物的调查，以事件发生地点为中心，

按水流方向在一定间隔的扇形或圆形范围内布点采样，并在近岸和中部布设水生生物采样点，沿岸浅水区（有水草区、无水草区）随机分散布点。

b) 对于河流水生生物的调查，应在事件发生地的上、中、下游，受影响支流汇合口及上游、下游等河段设置水生生物调查采样断面。

c) 对受损害水体影响的陆生生物（如鸟类、两栖动物和其他陆生动物及岸边植物）的调查，根据生物类型，在受损害水体的两边 50m~100m 范围内布点调查。

采样方法具体参照 HJ 710.4、HJ 710.6、HJ 710.7、HJ 710.8、HJ 710.12 以及《污染死鱼调查方法（淡水）》等相关技术规范执行，缺少规定的，可以参考 HY/T 078 等相关技术规范执行。采样时间应考虑生物节律，包括植物的季节变化以及动物的季节变化和日变化。水生生物调查采样方法参阅推荐性引用附录 B。

6.4.4.5 其他

如果地表水对岸边土壤可能造成污染，地表水与地下水存在连通的可能，需要对土壤和地下水开展必要的布点采样，可将污染地表水水体作为污染源，参照《生态环境损害鉴定评估技术指南 土壤与地下水》等相关技术规范进行布点采样。

如果特征污染物是挥发性有机污染物，需要结合风向、地表水流速对大气环境开展必要的布点采样，一般在下风向进行扇形布点，具体参照 HJ 589。

如果因外来物种入侵导致生物受损，需要对外来物种种类、来源、数量等开展调查，有针对性的布点观测。

如果因矿产开采导致地表水、沉积物及水生生物陷漏，需要对地下水连通情况进行必要的布点调查。

6.5 样品检测分析

水质样品参照 HJ 493 的相关规定进行采集和保存，沉积物样品参照 HJ/T 166 的相关规定进行采集和保存。生物样品参照 GB/T 14551、GB/T 5009 等相关标准技术规范执行。

地表水和废水样品的分析参照 HJ/T 91 等监测技术规范，应采用现有国家标准分析方法或等效分析方法进行测定。若污染物无国家标准分析方法或等效分析方法，可采用转化的国外标准分析方法或业界认可的先进分析方法，但需通过资质认定并经过委托方签字认可。新型污染物的分析方法可以参考生态环境部相关水质、土壤和沉积物环境监测规范。检出限应低于污染物在相应水环境介质中的国家标准限值，没有标准限值的，可参考国外标准限值。

监测结果可用定性、半定量或定量来表示。定性监测结果可用“检出”或“未检出”表示，并注明监测项目的检出限；半定量监

测结果可给出所测污染物的测定结果或测定结果范围；定量监测结果应给出所测污染物的测定结果。

应制定防止样品污染的工作程序，包括空白样分析、现场重复样分析、采样设备清洗空白样分析、采样介质对分析结果影响分析、样品保存方式和时间对分析结果的影响等。实验室分析的质量保证和质量控制的具体要求见 HJ 194、HJ/T 166 和 HJ/T 91、HJ/T 164、HJ 630 等相关监测技术规范。

6.6 基线调查与确认

6.6.1 优先使用历史数据作为基线水平

查阅相关历史档案或文献资料，包括针对调查区开展的常规监测、专项调查、学术研究等过程获得的文字报告、监测数据、照片、遥感影像、航拍图片等结果，获取能够表征调查区地表水和沉积物环境质量和生态系统服务功能历史状况的数据。

6.6.2 以对照区调查数据作为基线水平

当调查区地表水与沉积物环境质量以及水生态系统服务功能历史状况的数据无法获取时，可以选择合适的对照区，以对照区的调查监测数据作为基线水平。通过对与水生态环境事件发生前调查区水环境质量、水生态系统服务功能相近状态的上游或其他支流对照水域进行现场调查与监测，评价其水环境质量和生态状况，获取基线水平数据。对照点位的水功能区、气候条件、自

然资源、水文地貌及水生生物区系等性质条件应与评估水域近似。

结合对照区现场条件以及基线水平确定实际需求，可以选择数个点位作为对照点位，通过水环境质量和水生态状况的评价与比较，确定针对调查区特定评价指标的基线水平。该方法不适用于调查区存在复杂的非点源污染，以及其他生态干扰、生物数据不完整的情形。

6.6.3 参考环境质量标准确定基线水平

如果无法获取历史数据和对照区数据，则根据调查区地表水和沉积物的使用功能，查找相应的地表水和沉积物环境质量标准或基准，如 GB 3838、GB 5084、GB 11607 等。如果存在多个适用标准，应该根据评估区所在地区技术、经济水平和环境管理需求选择标准。

6.6.4 专项研究

如果无法获取历史数据和对照区数据，且无可用的水环境质量标准时，应开展专项研究，对于污染物指标，根据水质基准制定技术指南，如 HJ 831、HJ 837、HJ 838，推导确定基线水平。

6.6.5 基线确认的工作程序

6.6.5.1 基线信息调查搜集

基线信息调查搜集主要包括：①针对调查区的专项调查、学术研究以及其他自然地理、生态环境状况等相关历史数据；②针

对与调查区的地理位置、气候条件、水文地貌、水功能区类型、水生生物区系等类似的未受影响的对照区，搜集水环境与水生态状况的相关数据；③污染物的水环境基准和标准；④污染物的水生态毒理学效应、调查区生物多样性分布等文献调研和实验获取数据。

6.6.5.2 基线确定方法筛选

当基线确定所需的数据充分时，优先采用历史数据和对照区调查数据，当利用历史数据和对照区调查数据不能确定基线时，推荐采用环境质量标准或通过专项研究推导确定基线。

6.6.5.3 基线水平的确定

综合采用 2 种以上基线确定方法，推导计算基线水平期望值，对基线水平期望值的科学性和合理性进行评价和相互验证，确定评估区的地表水与沉积物环境质量以及水生态系统服务功能的基线水平。

6.7 损害确认

当事件导致以下一种或几种后果时，可以确认造成了地表水和沉积物的生态环境损害：

a)地表水和沉积物中特征污染物的浓度，超过基线水平 20% 以上；

b) 评估区指示性水生生物物种种群数量、密度、结构、群落组成、结构、生物物种丰度等指标，与基线水平相比存在统计学显著差异，或水生生物体出现明显畸形；

c) 水生生物组织中特征污染物的残留浓度，超过基线水平20%以上；

d) 水生态系统不再具备基线状态下的服务功能，例如支持功能（如生物多样性、岸带稳定性维持等）的降低或丧失、产品供给服务（如水产品养殖、饮用和灌溉用水供给等）的丧失、调节服务（如涵养水源、水体净化、气候调节等）的降低或丧失、文化旅游服务（如休闲娱乐、景观观赏等）的降低或丧失。

7 地表水与沉积物损害因果关系分析

7.1 污染环境行为导致损害的因果关系分析

结合鉴定评估准备以及损害调查确认阶段获取的损害事件特征、评估区域环境条件、地表水和沉积物污染状况等信息，采用必要的技术手段对污染源进行解析；开展污染介质、载体调查，提出特征污染物从污染源到受体的暴露评估，并通过暴露路径的合理性、连续性分析，对暴露路径进行验证，必要时构建迁移和暴露路径的概念模型；基于污染源分析和暴露评估结果，分析污染源与地表水和沉积物环境质量损害、水生生物损害、水生态系统服务功能损害之间是否存在因果关系。

7.1.1 污染物源性分析

在已有污染源调查结果的基础上,通过人员访谈、现场踏勘、空间影像识别等手段和方法,调查潜在的污染源,必要时开展进一步的水文和水文地质与水生生物调查。根据实际情况选择合适的检测和统计分析方法确定污染源。

污染物源性分析常用的检测和统计分析方法包括:

a) 指纹法

采集潜在污染源和受体端地表水、沉积物和生物样品,分析污染物类型、浓度、组分等情况,采用指纹法进行特征比对,判断受体端和潜在污染源的源性,确定污染源;

b) 同位素技术

对于损害时间较长,且特征污染物为铅、镉、锌、汞等重金属或含有氯、碳、氢等元素的有机物时,可采用同位素技术,对地表水和沉积物样品进行同位素分析,根据同位素组成和比例等信息,判断受体端和潜在污染源的源性,确定污染源;

c) 多元统计分析法

采集潜在污染源和受体端地表水和沉积物样品,分析污染物类型、浓度等情况,采用相关性分析、主成分分析、聚类分析、因子分析等统计分析方法分析污染物或样品的相关性,判断受体端和潜在污染源的源性,确定污染源。

7.1.2 暴露评估

暴露评估的目的是评估潜在受影响的水体和水生生物暴露于污染源的方式、时间和路径。

7.1.2.1 暴露性质、方式和持续时间

暴露评估需要考虑的因素包括环境暴露的性质或方式；暴露的时间（例如持续与间歇）；与其他环境因素的关系，如溶解氧浓度的日变化、水文水动力因素（影响扩散）；暴露的持续性（例如急性与慢性、连续与间歇、生物代暴露等），以及影响暴露的局部水文、地球化学或生态因素等。

7.1.2.2 暴露路径分析与确定

基于前期调查获取的信息，对污染物的传输机理和释放机理进行分析，初步构建污染物暴露路径概念模型，识别传输污染物的载体和介质，提出污染源到受体之间可能的暴露路径的假设。

传输的载体和介质包括水体、沉积物和水生生物。

涉及地表水和沉积物的污染物传输与释放机理主要包括：地表水径流与物理迁移扩散，沉积物-水相的扩散交换，悬浮颗粒物和沉积物的物理吸附、解吸，沉积物的沉积、再悬浮和掩埋；污染物在暴露迁移过程中发生的沉淀溶解、氧化还原、光解、水解等化学反应过程。

涉及生物载体的污染物传输与释放机理主要包括：水生生物从地表水和沉积物介质摄取污染物的过程（经鳃吸收、摄食等），生物体内传输代谢和清除过程（鳃转移、组织分布、代谢转化、

排泄、生长稀释等)，生物受体之间的食物链传递与生物放大作用。

建立暴露路径后，需要对其是否存在进行验证，即识别组成暴露途径的暴露单元，对每一单元内的污染物浓度，污染物的迁移机制和路线以及该单元的暴露范围进行分析，以此确定各个暴露单元是否可以组成完整的暴露路径，将污染源与生物受体连接起来。

7.1.2.3 二次暴露

如果释放的污染物在地表水和沉积物中发生反应并产生副产物，则可能发生二次暴露。污染物可以直接发生二次物理和生物效应，例如，如果污染物释放破坏了具有稳定河床或缓和温度功能的植被，鱼类可能会暴露于过多的沉积物或过高的温度中，即污染物释放产生二次影响。对于具有生物累积性的污染物可以通过食物网的传递发生二次暴露。

7.1.2.4 关联性证明

建立暴露路径，识别污染物与损害结果的关联后，进一步通过文献回顾、实验室实证研究和模型模拟方法对损害关联性进行证明。

首先基于现有文献，对污染物与损害之间的暴露-反应关系进行研究判断，如果文献信息不足，进一步采用实验与模型模拟研究方法，对污染物与损害之间的暴露-反应关系进行验证判断。

通过对与评估区暴露条件类似的损害与暴露关系进行实验室研究，来确定实际评估区的暴露-反应关系，该方法可单独使用，也可以与模型模拟方法配合适用。

模型提供了一种模拟污染物与环境 and 受体之间相互作用的方法，可以对污染事件产生的水环境暴露与损害结果进行预测。

针对特征污染物的理化特性以及在水体中的迁移转化过程，可采用水动力模型和水质模型模拟预测水环境污染事件发生后污染物在水体中的暴露迁移过程；河流、湖库、入海河口等不同类型地表水体污染物的常用水动力模型和水质模型包括河流/湖库均匀混合模型（零维模型）、纵向一维模型、河网模型（河流）、垂向一维模型（湖库）、平面二维模型、立面二维模型、三维模型等。模型适用范围、基本方程和解法以及参考资料，参阅推荐性引用附录 C。

针对特征污染物的理化特性、暴露在不同介质的传输分布以及与生物受体之间的相互作用，可采用环境逸度模型模拟预测污染物在气、水、底泥、生物体等环境介质中的分布动态与归趋，例如模拟地表水-沉积物暴露归趋的 QWASI 模型、模拟水生生物富集和食物链传递的 FISH 和 FOOD WEB 模型；采用生态模型模拟水生态系统综合效应，例如 AQUATOX 模型。模型适用范围与参考资料，参阅推荐性引用附录 D。

7.1.3 因果关系分析

同时满足以下条件，可以确定污染源与地表水、沉积物以及水生生物和水生态系统服务功能损害之间存在因果关系：

- a) 存在明确的污染源；
- b) 地表水与沉积物环境质量下降，水生生物、水生态系统服务功能受到损害；
- c) 排污行为先于损害后果的发生；
- d) 受体端和污染源的污染物存在同源性；
- e) 污染源到受损地表水与沉积物以及水生生物、水生态系统之间存在合理的暴露路径。

7.2 破坏生态行为导致损害的因果关系分析

通过文献查阅、现场调查、专家咨询等方法，分析非法捕捞、湿地围垦、非法采砂等破坏生态行为导致水生生物资源和水生态系统服务功能以及地表水环境质量受到损害的作用机理，建立破坏生态行为导致水生生物和水生态系统服务功能以及地表水环境质量受到损害的因果关系链条。破坏生态行为导致损害的因果关系判定原则具体包括：

- a) 存在明确的破坏生态行为；
- b) 水生生物、水生态系统服务功能受到损害或水环境质量下降；
- c) 破坏生态行为先于损害的发生；

d) 根据水生态学和水环境学理论，破坏生态行为与水生生物资源、水生态系统服务功能损害或水环境质量下降具有关联性；

e) 可以排除其他原因对水生生物资源、水生态系统服务功能损害或水环境质量下降的贡献。

8 地表水与沉积物损害实物量化

确定地表水和沉积物中特征污染物浓度，以及水生生物质量、种群类型、数量和密度、水生态系统服务功能表征指标的现状水平，与基线水平进行比较，分析地表水与沉积物环境以及水生生物资源、水生态系统服务功能受损的范围和程度，计算地表水和沉积物环境，以及水生生物资源和水生态系统服务功能损害的实物量。

8.1 损害程度量化

损害程度量化是对地表水与沉积物中特征污染物浓度、水生生物质量、种群类型、数量和密度、水生态系统服务功能超过基线水平的程度进行分析，为水生态环境与水生生物资源恢复方案的设计和恢复费用的计算、价值量化提供依据。

8.1.1 污染物浓度

基于地表水与沉积物中特征污染物浓度与基线水平，确定每个评估点位地表水和沉积物的受损害程度，根据以下公式计算：

$$K_i = (T_i - B) / B$$

式中， K_i 为某评估点位地表水与沉积物的受损害程度；

T_i 为某评估点位地表水与沉积物中特征污染物的浓度；

B 为地表水与沉积物中特征污染物的基线水平。

基于地表水、沉积物中特征污染物平均浓度超过基线水平的区域面积占评估区面积的比例，确定评估区地表水与沉积物的受损害程度：

$$K=N_0/N$$

式中， K 为超基线率，即评估区地表水、沉积物中特征污染物平均浓度超过基线水平的区域面积占评估区面积的比例；

N_0 为评估区地表水、沉积物中特征污染物平均浓度超过基线水平的区域面积；

N 为地表水、沉积物评估区面积。

8.1.2 水生生物量

根据区域水环境条件和对照点水生生物状况，选择具有重要社会经济价值的水生生物和指示生物，参照 GB/T 21678，采用下式估算：

$$Y_l = \sum D_i \times R_i \times A_p$$

式中， Y_l 为生物资源（包括鱼、虾、贝等水产品）损失量，单位为 kg 或尾；

D_i 为近 3 年内同期第 i 种生物资源密度，单位为 kg/km^2 或尾/ km^2 ;

R_i 为第 i 种生物资源损失率，%;

A_p 受损害面积，单位为 km^2 。

生物资源损失率按下式计算：

$$R = \frac{\bar{D} - D_p}{\bar{D}} \times 100\% - E$$

式中， R 为生物资源损失率，%;

\bar{D} 为近 3 年内同期水生生物资源密度，单位为 kg/km^2 或尾/ km^2 ;

D_p 为损害后水生生物资源密度，单位为 kg/km^2 或尾/ km^2 ;

E 为回避逃逸率，%。

8.1.3 水生生物多样性

从重点保护物种减少量、生物多样性变化量两方面进行评价。

a) 重点保护物种减少量 (ΔS)

$$\Delta S = NB - NP$$

式中， NB 和 NP 分别是基线水平和损害影响范围下的重点保护物种数。

b) 生物多样性变化

$$\Delta BD_i = BD_{i0} - BD_i$$

式中， ΔBD_i 、 BD_{i0} 和 BD_i 分别是第*i*类生物多样性指数（如鱼类、浮游动物、大型底栖动物、两栖动物等）变化量、基线水平和损害发生后的生物多样性指数。

生物多样性指数可以采用香农-威纳指数：

$$H = - \sum (P_i)(\ln P_i)$$

式中，*H*为群落物种多样性指数；

P_i 为第*i*种物种的个体数占总个体数的比例；如总个体数为*N*，第*i*种个体数为*n_i*，则 $P_i=n_i/N$ 。

8.1.4 水生态系统服务功能

如果涉及除水产品或生物多样性支持以外的水生态系统服务功能受损，如支持功能（地形地貌破坏量）、产品供给服务（水资源供给量、砂石资源破坏量）、调节服务（水源涵养量、蒸散量、污染物净化量、土壤保持量）、文化服务（休闲娱乐水平、旅游人次）等受到严重影响，常见水生态系统服务功能量化方法参阅推荐性引用附录E。可根据水生态系统服务功能的类型特点和评估水域实际情况，选择适合的评估指标，确定水生态系统服务功能的受损害程度或损害量。

$$K=(B-S)/B$$

式中， K 为水生态系统服务功能的受损害程度；

B 为水生态系统服务功能指标的基线水平；

S 为损害发生后水生态系统服务功能指标的水平。

$$K' = B' - S'$$

式中， K' 为水生态系统服务功能的受损量；

B' 为损害发生前水生态系统服务功能量；

S' 为损害发生后水生态系统服务功能量。

8.2 损害范围量化

根据各采样点位地表水与沉积物、水生生物、水生态系统损害确认和损害程度量化的结果，分析地表水与沉积物环境质量、水生生物、水生态系统服务功能等不同类型损害的空间范围。对于涉及污染物泄漏、污水排放、废物倾倒等污染地表水的突发水环境污染事件中，缺少实际调查监测数据的生态环境损害，可以通过收集污染排放数据、水动力学参数、水文地质参数、水生态效应参数，构建水动力学、水质模拟、水生态效应概念模型，模拟污染物在地表水与沉积物中的迁移扩散情况，不同位置的污染物浓度及其随时间的变化，确定损害空间范围。

根据污染物的生物毒性、生物富集性、生物致畸性等特性以及水环境治理方案、水生态恢复方案，判断生物资源类生态环境损害的时间范围。

涉及产品供给服务、水源涵养等调节服务、航运交通和栖息地等支持功能、休闲旅游等文化服务功能的，分析水生态环境损害和水环境治理方案、水生态恢复方案实施对产品供给、水源涵养、航运交通、生物栖息地、休闲舒适度、旅游人次等生态系统服务功能的影响的持续时间。

9 地表水与沉积物损害恢复

损害情况发生后，如果地表水与沉积物中的污染物浓度在两周内恢复至基线水平，水生生物种类、形态和数量以及水生态系统服务功能未观测到明显改变，采用实际治理成本法统计处置费用。

如果地表水与沉积物中的污染物浓度不能在两周内恢复至基线水平，或者能观测或监测到水生生物种类、形态、质量和数量以及水生态系统服务功能明显改变，应判断受损的地表水与沉积物、水生生物以及水生态系统服务功能是否能够通过实施恢复措施进行恢复，如果可以，基于等值分析方法，制定基本恢复方案，计算期间损害，制定补偿性恢复方案；如果制定的恢复方案未能将地表水与沉积物完全恢复至基线水平并补偿期间损害，制定补充性恢复方案。

如果受损地表水与沉积物、水生生物以及水生态系统服务功能不能通过实施恢复措施进行恢复或完全恢复到基线水平，或不能通过补偿性恢复措施补偿期间损害，基于等值分析原则，采用

环境资源价值评估方法对未予恢复的地表水与沉积物环境、水生生物资源以及水生态系统服务功能损失进行计算。

9.1 恢复方案的制定

9.1.1 恢复目标确定

基本恢复的目标是将受损的地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能恢复至基线水平。如果由于现场条件或技术可达性等限制原因，地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能不能完全恢复至基线水平，根据水功能规划，确定基本恢复目标。基本恢复目标低于基线水平的，根据本指南第 9.2 节推荐的环境资源价值量化方法计算相应的损失。

补偿性恢复的目标是补偿受损地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能恢复至基线水平期间的损害。

如果由于现场条件或技术可达性等限制原因，地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能的基本恢复方案实施后未达到基本恢复目标或补偿性恢复方案未达到补偿期间损害的目标，则应开展补充性恢复或者采用环境资源价值量化方法计算相应的损失。

对于水生态系统受到影响的事件，选择具有代表性的水生生物、水生态系统服务功能作为恢复目标。

9.1.2 恢复技术筛选

地表水和沉积物损害的恢复技术包括地表水治理技术、沉积物修复技术、水生生物恢复技术、水生态系统服务功能修复与恢复技术。在掌握不同恢复技术的原理、适用条件、费用、成熟度、可靠性、恢复时间、二次污染和破坏、技术功能、恢复的可持续性等因素的基础上，参照类似案例经验，结合地表水与沉积物污染特征、水生生物和水生态系统服务功能的损害程度、范围和特征，从主要技术指标、经济指标、环境指标等方面对各项恢复技术进行全面分析比较，确定备选技术；或采用专家评分的方法，通过设置评价指标体系和权重，对不同恢复技术进行评分，确定备选技术。提出一种或多种备选恢复技术，通过实验室小试、现场中试、应用案例分析等方式对备选恢复技术进行可行性评估。基于恢复技术比选和可行性评估结果，选择和确定恢复技术。

常用地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能修复和恢复技术适用条件与技术性能参阅推荐性引用附录 F。

9.1.3 恢复方案确定

根据确定的恢复技术，可以选择一种或多种恢复技术进行组合，制定备选的综合恢复方案。综合恢复方案可能同时涉及基本恢复方案、补偿性恢复方案和补充性恢复方案，可能的情况包括：

a) 仅制定基本恢复方案，不需要制定补偿性和补充性恢复方案：损害持续时间短于或等于一年，现有恢复技术可以使受损

的地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能在一年内恢复到基线水平，经济成本可接受，不存在期间损害。

b) 需要分别制定基本恢复方案和补偿性恢复方案：损害持续时间长于一年，有可行的恢复方案使受损的地表水与沉积物环境、水生生物以及水生态系统服务功能在一年以上较长时间内恢复到基线水平，实施成本与恢复后取得的收益相比合理，存在期间损害。

补偿性恢复方案包括恢复具有与评估水域类似生态系统服务功能水平的异位恢复，使受损水域具有更高生态系统服务功能水平的原位恢复，达到类似生态系统服务功能水平的替代性恢复，如受污染沉积物经风险评估无需修复，可以异位修复另外一条工程量相同的被污染河流沉积物，或通过原位修建孵化场培育较基线种群数量更多的水生生物，或通过修建污水处理设施替代受污染的地表水自然恢复损失等资源对等或服务对等、因地制宜的水环境、水生生物或水生态恢复方案。制定补偿性恢复方案时应采用损害程度和范围等实物量指标，如污染物浓度、生物资源数量、河流或湖库的长度或面积。

c) 需要分别制定基本恢复方案、补偿性恢复方案和补充性恢复方案：有可行的恢复方案使受损的地表水与沉积物环境、水生生物、水生态系统服务功能在一年以上较长时间内恢复到基线水平，实施成本与恢复后取得的收益相比合理，存在期间损害，

需要制定补偿性恢复方案；基本恢复和补偿性恢复方案实施后未达到既定恢复目标的，需要进一步制定补充性恢复方案，使受损的地表水与沉积物环境、水生生物、水生态系统服务功能实现既定的基本恢复和补偿性恢复目标。

d) 现有恢复技术无法使受损的地表水与沉积物环境、水生生物、水生态系统服务功能恢复到基线水平，或只能恢复部分受损的地表水与沉积物环境以及水生态系统服务功能，通过环境资源价值评估方法对受损地表水与沉积物环境、水生生物、水生态系统服务功能，以及相应的期间损害进行价值量化，见本指南第9.2节。

由于基本恢复方案和补偿性恢复方案的实施时间与成本相互影响，应考虑损害的程度与范围、不同恢复技术和方案的难易程度、恢复时间和成本等因素，对综合恢复方案进行比选。参阅《环境损害鉴定评估推荐方法（第Ⅱ版）》附录B。

综合恢复方案的筛选应统筹考虑地表水和沉积物环境质量、水生生物资源以及其他水生态系统服务功能的恢复，并结合不同方案的成熟度、可靠性、二次污染、社会效益和经济效益等因素确定，参阅《生态环境损害鉴定评估技术指南 损害调查》附录表C-8。综合分析和比选不同备选恢复方案的优缺点，确定最佳恢复方案。

9.1.4 恢复费用计算

需要对恢复费用进行计算时，根据地表水与沉积物环境、水生生物、水生态系统服务功能的基本恢复、补偿性恢复和补充性恢复方案，按照下列优先级顺序选用计算方法，计算恢复方案实施所需要的费用。

a) 实际费用统计法

实际费用统计法适用于污染清理、控制、修复和恢复措施已经完成或正在进行的情况。收集实际发生的费用信息，参照《生态环境损害鉴定评估技术指南 损害调查》附录表 C-7，并对实际发生费用的合理性进行审核后，将统计得到的实际发生费用作为恢复费用。

b) 费用明细法

费用明细法适用于工程方案比较明确，各项具体工程措施及其规模比较具体，所需要的设施、材料、设备等比较确切，各要素的成本比较明确的情况。费用明细法应列出具体的工程措施、各项措施的规模，明确需要建设的设施以及需要用到的材料和设备的数量、规格和能耗等内容，根据各种设施、材料、设备、能耗的单价，列出工程费用明细。具体包括投资费、运行维护费、技术服务费、固定费用。投资费包括场地准备、设施安装、材料购置、设备租用等费用；运行维护费包括检查维护、监测、药剂等易耗品购置、系统运行水电消耗和其它能耗、污泥和废弃物处理处置等费用；技术服务费包括项目管理、调查取样和测试、质

量控制、试验模拟、专项研究、方案设计、报告编制等费用；固定费用包括设备更新、设备撤场、健康安全防护等费用。

c) 承包商报价法

承包商报价法适用于工程方案比较明确，各项具体工程措施及其规模比较具体，所需要的设施、材料、设备等比较确切，但各要素的成本不确定的情况。承包商报价法应选择3家或3家以上符合要求的承包商，由承包商根据恢复目标和恢复方案提出报价，对报价进行综合比较，确定合理的恢复费用。

d) 指南或手册参考法

指南或手册参考法适用于已经筛选确定恢复技术，但具体工程方案不明确的情况。基于所确定的恢复技术，参照相关指南或手册，确定技术的单价，根据待治理的地表水与沉积物量、水生生物和水生态系统恢复量，计算恢复费用。

e) 案例比对法

案例比对法适用于恢复技术和工程方案不明确的情况。调研与项目规模、污染特征、生态环境条件相类似且时间较为接近的案例，基于类似案例的恢复费用，计算本项目可能的恢复费用。

9.2 环境资源价值量化方法

9.2.1 实际治理成本法

对于污染清理、控制、修复和恢复措施已经完成或正在进行的情况，比如，通过应急处置措施得到有效处置、没有产生二次

污染影响的突发水环境污染事件，应该采用实际治理成本法计算生态环境损害，参照本指南第 9.1.4 条。

9.2.2 虚拟治理成本法

对于向水体排放污染物的事实存在，但由于生态环境损害观测或应急监测不及时等原因导致损害事实不明确或生态环境已自然恢复，或者不能通过恢复工程完全恢复的生态环境损害，或者实施恢复工程的成本远远大于其收益的情形，采用虚拟治理成本法计算生态环境损害。具体参照《关于虚拟治理成本法适用情形与计算方法的说明》。

9.2.3 其他环境资源价值量化方法

对于地表水与沉积物环境质量及其水生态系统服务功能无法自然或通过工程恢复至基线水平，没有可行的补偿性恢复方案补偿期间损害，或没有可用的补充性恢复方案将未完全恢复的地表水与沉积物环境质量及其水生态系统服务功能恢复至基线水平或补偿期间损害时，需要根据评估区的生态系统服务功能，采用直接市场价值法、揭示偏好法、效益转移法、陈述偏好法等方法，对不能恢复或不能完全恢复的生态系统服务功能及其期间损害进行价值量化。

对于以水产品养殖为主要服务功能的水域，建议采用市场价值法计算水产品养殖生产服务损失；对于以水资源供给为主要服务功能的水域，建议采用水资源影子价格法计算水资源功能损

失；对于以生物多样性和自然人文遗产维护为主要服务功能的水域，建议采用恢复费用法计算支持功能损失，当恢复方案不可行时，建议采用支付意愿法、物种保育法计算；对于砂石开采影响地形地貌和岸带稳定的情形，建议采用市场价值法计算砂石资源直接经济损失，采用恢复费用（实际工程）法计算岸带稳定支持功能损失；对于航运支持功能的影响，建议采用市场价值法计算直接经济损失；对于洪水调蓄、水质净化、气候调节、土壤保持等调节功能的影响，建议采用恢复费用法计算，当恢复方案不可行时，建议采用替代成本法计算调节功能损失；对于以休闲娱乐、景观科研为主要服务功能的水域，建议采用旅行费用法计算文化服务损失，当旅行费用法不可行时，建议采用支付意愿法计算。常见水生态系统服务功能价值量化方法参阅推荐性引用附录 E。如果采用非指南推荐的方法进行环境资源价值量化评估，需要详细阐述方法的合理性。

10 地表水与沉积物恢复效果评估

制定恢复效果评估计划，通过采样分析、现场观测、问卷调查等方式，定期跟踪地表水与沉积物环境以及水生态系统服务功能的恢复情况，全面评估恢复效果是否达到预期目标；如果未达到预期目标，应进一步采取相应措施，直到达到预期目标为止。

10.1 评估时间

恢复方案实施完成后，地表水与沉积物的物理、化学和生物学状态以及水生态系统服务功能基本达到稳定时，对恢复效果进行评估。

地表水恢复效果通常采用一次评估，沉积物与水生态系统服务功能恢复效果通常需要结合污染物特征、恢复方案实施进度、水生态系统服务功能恢复进展进行多次评估，直到沉积物环境质量与水生态系统服务功能完全恢复至基线水平，至少持续跟踪监测 12 个月。

10.2 评估内容和标准

恢复过程合规性，即恢复方案实施过程是否满足相关标准规范要求，是否产生了二次污染。

恢复效果达标性，即根据基本恢复、补偿性恢复、补充性恢复方案中设定的恢复目标，分别对基本恢复、补偿性恢复、补充性恢复的效果进行评估。

恢复效果评估标准参照本指南第 9.1 节确定的恢复目标。

10.3 评估方法

10.3.1 现场踏勘

通过现场踏勘，了解地表水与沉积物环境质量以及水生态系统服务功能恢复进展，判断地表水与沉积物是否仍有异常气味或颜色，观察关键水生态系统服务功能指标的恢复情况，确定监测、观测与调查时点、周期和频次。

10.3.2 监测分析

根据恢复效果评估计划，对恢复后的地表水与沉积物进行采样监测，分析地表水与沉积物污染物浓度等指标，开展生物调查以及水生生态系统服务功能调查。调查应覆盖全部恢复区域，并基于恢复方案的特点制定分别针对地表水与沉积物环境以及水生生态系统服务功能的差异化监测调查方案。基于监测调查结果，采用逐个对比法或统计分析法判断是否达到恢复目标。

10.3.3 分析比对

采用分析比对法，对照地表水与沉积物环境治理与水生态恢复方案，以及相关的标准规范，分析地表水与沉积物环境治理以及水生生态系统服务功能恢复过程中各项措施是否与方案一致，是否符合相关标准规范的要求；分析治理和恢复过程中的相关监测、观测数据，判断是否产生了二次污染和其他生态影响；综合评价治理恢复过程的合规性。

10.3.4 问卷调查

通过设计调查表或调查问卷，调查基本恢复、补偿性恢复、补充性恢复措施所提供的生态系统服务功能类型和服务量，判断是否达到恢复目标；此外，调查公众与其他相关方对于恢复过程和结果的满意度。

11 报告编制

根据委托内容，基于评估过程所获得的数据和信息，编制地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估报告，报告的格式和内容参见附录 A。按照委托要求，报告可包括附录 A 的部分或全部内容。

附录A

评估报告编制要求

A.1 概述

A.1.1 事件基本情况

介绍地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估的背景。对于水环境污染事件，应写明环境损害发生的时间、地点、起因和经过，污染物类型、性质、产生和排放量，污染损害类型、范围与程度。对于突发水环境污染事件，应写明事件发生后采取的应急处置措施等基本情况；如果涉及企事业单位废水和废弃物排放、泄漏等情况，应写明生产经营历史、生产工艺、产排污环节、历史突发水环境事件、潜在污染源，倾倒、排放、泄漏的废水或废弃物类型、排放量，特征污染物及其排放量，前期采取的污染控制或污染物清理措施等基本情况。对于水生态破坏事件，应写明生态破坏发生的时间、地点、起因和经过，生态系统服务功能破坏的类型、范围和程度，对地表水与沉积物的影响方式，已经采取的生态恢复措施等基本情况。

A.1.2 区域基本情况

简要介绍地表水与沉积物生态环境损害区域的自然环境状况和社会经济状况。自然环境状况包括地形地貌、水文和水文地质、气候气象，地表水利用历史、现状和规划，环境敏感区分布，水生态系统服务功能类型等内容。社会经济状况包括经济和主要产业的现状和发展状况，地方法规政策和标准规范，人口、交通、基础设施、能源和水源供给等内容。

A.1.3 鉴定评估工作基本情况

A.1.3.1 鉴定评估目标

依据委托方委托的鉴定评估事项，阐明开展地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估的目标。

A.1.3.2 鉴定评估依据

写明开展地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估所依据的法律法规、标准、技术规范等内容。

A.1.3.3 鉴定评估范围

写明地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估的损害类型、时间范围、空间范围及确定依据。

A.1.3.4 鉴定评估内容

写明地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估工作的主要内容，包括地表水与沉积物损害调查确认、因果关系分析、损害实物量化、损害恢复、恢复效果评估等方面。

A.1.3.5 鉴定评估工作程序

详细阐明开展地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估工作的技术路线和工作程序，并给出相应的流程图。

A.2 地表水与沉积物损害调查确认

A.2.1 确定调查对象与范围

写明影响水域的水生态环境服务功能主要类型，以及调查重点和调查范围划定的依据。

A.2.2 确定调查指标

写明需要开展调查、监测和评估的特征污染物、水文与水文地质指标、水生生物、水生态系统服务功能指标，说明指标筛选和确定的依据。

A.2.3 水文和水文地质调查

介绍损害调查确认过程中所开展的水文和水文地质调查的调查目的、调查方法和调查结果，包括影响水域所在水系、流域湖库边界、断面形状、流向、流速、流量、水温、降雨量、蒸发量、泥沙含量、本底水质等指标。

A.2.4 地表水与沉积物环境调查

阐述所开展的地表水、沉积物环境状况调查过程，包括采样点位布设方案和依据，样品采集、保存和流转方法，分析测试方法，质量控制措施。分析地表水、沉积物环境状况调查结果，包括污染物类型、浓度和范围。

A.2.5 水生态系统服务功能调查

介绍水生态系统服务功能调查过程、调查方法和调查结果，对于水环境污染事件，需要阐明污染物对水生生物的影响程度，开展生物组织残留浓度测定的原因与结果。

A.2.6 地表水与沉积物生态环境基线

描述地表水与沉积物环境、水生态系统服务功能基线水平确定的过程，详细阐明理由。如果采用对照区域数据作为基线水平，应阐述对照区域调查过程，包括点位布设方案和依据，样品采集、保存和流转方法，分析测试方法，质量控制措施，以及调查结果。如

果针对基线水平进行了专项研究，应阐述研究所用到的方法、模型、参数以及研究结果等内容。

A.2.7 损害确认

写明地表水与沉积物环境与水生态系统服务功能损害确认的结果，包括是否存在生态环境损害、生态环境损害类型、生态环境损害区域等内容。

A.3 地表水与沉积物损害因果关系分析

A.3.1 污染环境行为导致损害的因果关系分析

对于污染环境行为导致的损害，其损害鉴定评估报告的因果关系分析部分应包含以下内容。

A.3.1.1 污染源分析

详细介绍污染源确定的思路、过程和结果，对各类潜在污染源进行描述。对于污染源不明确的情况，应说明污染源调查所采用的方法、过程和结果。当存在多个潜在污染源时，阐述污染源分析所采用的方法、过程和结果。如果开展了指纹图谱、同位素分析等专项研究，应详细阐明研究方案、过程与结果。

A.3.1.2 暴露评估

阐述“污染物-地表水-沉积物-生物受体-生物效应”的污染物传输、释放、暴露、影响和损害机理，提出污染物暴露路径概念模型，根据暴露水平和暴露时间，计算污染暴露产生的生物或生态效应。对暴露评估中建立的相关假设，通过文献总结、实验室实证研究和模型模拟等方法进行证明。

A.3.1.3 因果关系分析

总结污染源分析及暴露评估过程所获得的信息，依据环境污染因果关系判定原则，得出因果关系判定结论。

A.3.2 破坏生态行为导致损害的因果关系分析

对于破坏生态行为导致的损害，应阐述破坏生态行为导致地表水与沉积物以及水生生态系统服务功能受到损害的作用机理，依据生态破坏因果关系判定原则，得出因果关系判定结论。

A.4 地表水与沉积物损害实物量化

基于 A.2.6 所确定的基线水平，对地表水与沉积物以及水生生态系统服务功能、水生生物资源的损害程度和范围进行量化，计算地表水与沉积物环境质量的损害程度，以及水生生物资源损害量、水生生物栖息地面积、水资源量等生态系统服务功能受损程度，并给出地表水与沉积物及其水生生态系统服务功能的损害范围。

A.5 地表水与沉积物损害恢复或价值量化

阐明地表水与沉积物环境及水生生态系统服务功能综合恢复方案确定与价值量化的基本思路与依据。对于突发水环境污染事件，主要介绍实际水环境治理方案以及实际治理费用的统计核算。

如果基于恢复方案进行损害赔偿，应详细阐述基本恢复、补偿性恢复、补充性恢复的总体目标和分阶段目标及其确定依据，各个阶段所采用的恢复技术和方案及其比选过程。如果需要，基于所确定的恢复方案计算各阶段恢复费用。

如果基于环境价值量化方法确定损失，应阐述所用到的价值量化方法、选择依据、评估过程和评估结果。对于虚拟治理成本法，

重点介绍单位虚拟治理成本的确定方法、环境功能调整系数的确定依据。

A.6 地表水与沉积物恢复效果评估

阐述地表水与沉积物及水生态系统服务功能恢复效果评估内容、标准、效果评估过程所采用的方法及评估结果。写明地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能恢复过程规范性评价所依据的标准和评估结果。阐述效果评估点位布设方案和依据，调查方法（包含样品采集、保存和流转方法，分析测试方法，质量控制措施），以及调查结果。如果采用调查问卷或调查表对水生态系统服务功能和公众满意度进行调查，应详细介绍主要调查内容和结果。

实施地表水与沉积物恢复效果评估后，编写本章。

A.7 鉴定评估结论

针对地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估委托事项，写明每一项鉴定评估结论，包括地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能是否受到损害、损害是否与污染源或生态破坏行为具有因果关系、损害的范围和程度、受损地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能的恢复过程是否合规以及是否达到目标等内容。对涉及地表水与沉积物的生态环境损害鉴定评估过程中的特别事项进行说明，分析鉴定评估结论可能存在的不确定性。

对地表水与沉积物生态环境损害的补充性恢复、跟踪监测、效果评估等工作提出必要的建议。

A.8 签字盖章

阐明地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估报告的真实性、合法性、科学性；明确报告的所有权、使用目的和使用范围；所有参与报告编制的人员进行署名，并盖报告编制单位公章。

A.9 附件

附件包括地表水与沉积物生态环境损害鉴定评估工作过程中所制定的各类方案和所获取的各种证据资料，包括鉴定评估方案、各类调查监测方案、效果评估方案，各类调查监测数据和报告、效果评估报告，以及各类图件、照片、访谈记录等材料。

推荐性引用附录A

我国重点保护野生水生动物和鸟类相关物种

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
兽纲 MAMMALIA			
食肉目	CARNIVORA		
鼬科	Mustelidae		
*水獭 (所有种)	<i>Lutra</i> spp.		II
*小爪水獭	<i>Aonyx cinerea</i>		II
海牛目	SIRENIA		
儒艮科	Dugongidae		
*儒艮	<i>Dugong dugong</i>	I	
鲸目	CETACEA		
喙豚科	Platanistidae		
*白鱠豚	<i>Lipotes vexillifer</i>	I	
海豚科	Delphinidae		
*中华白海豚	<i>Sousa chinensis</i>	I	
*其它鲸类	(Cetacea)		II
啮齿目	RODENTIA		
河狸科	Castoridae		
河狸	<i>Castor fiber</i>	I	
鸟纲 AVES			
鸕鷀目	PODICIPEDIFORMES		
鸕鷀科	Podicipedidae		
角鸕鷀	<i>Podiceps auritus</i>		II
赤颈鸕鷀	<i>Podiceps grisegena</i>		II
鹱形目	PROCELLARIIFORMES		
信天翁科	Diomedidae		
短尾信天翁	<i>Diomedea albatrus</i>	I	
鸕形目	PELECANIFORMES		
鸕科	Pelecanidae		
鸕 (所有种)	<i>Pelecanus</i> spp.		II
鲣鸟科	Sulidae		
鲣鸟 (所有种)	<i>Sula</i> spp.		II
鸕科	Phalacrocoracidae		

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
海鸬鹚	<i>Phalacrocorax pelagicus</i>		II
黑颈鸬鹚	<i>Phalacrocorax niger</i>		II
军舰鸟科	Fregatidae		
白腹军舰鸟	<i>Fregata andrewsi</i>	I	
鹤形目	CICONIIFORMES		
鹭科	Ardeidae		
黄嘴白鹭	<i>Egretta eulophotes</i>		II
岩鹭	<i>Egretta sacra</i>		II
海南虎斑鸭	<i>Gorsachius magnificus</i>		II
小苇鸭	<i>Ixobrychus minutus</i>		II
鹳科	Ciconiidae		
彩鹳	<i>Ibis leucocephalus</i>		II
白鹳	<i>Ciconia ciconia</i>	I	
黑鹳	<i>Ciconia nigra</i>	I	
鸚科	Threskiornithidae		
白鸚	<i>Threskiornis aethiopicus</i>		II
黑鸚	<i>Pseudibis papillosa</i>		II
朱鸚	<i>Nipponia nippon</i>	I	
彩鸚	<i>Plegadis falcinellus</i>		II
白琵鹭	<i>Platalea leucorodia</i>		II
黑脸琵鹭	<i>Platalea minor</i>		II
雁形目	ANSERIFORMES		
鸭科	Anatidae		
红胸黑雁	<i>Branta ruficollis</i>		II
白额雁	<i>Anser albifrons</i>		II
天鹅（所有种）	<i>Cygnus spp.</i>		II
鸳鸯	<i>Aix galericulata</i>		II
中华秋沙鸭	<i>Mergus squamatus</i>	I	
鹤形目	GRUIFORMES		
鹤科	Gruidae		
灰鹤	<i>Grus grus</i>		II
黑颈鹤	<i>Grus nigricollis</i>	I	
白头鹤	<i>Grus monacha</i>	I	
沙丘鹤	<i>Grus canadensis</i>		II
丹顶鹤	<i>Grus japonensis</i>	I	

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
白枕鹤	<i>Grus vipio</i>		II
白鹤	<i>Grus leucogeranus</i>	I	
赤颈鹤	<i>Grus antigone</i>	I	
蓑羽鹤	<i>Anthropoides virgo</i>		II
秧鸡科	Rallidae		
长脚秧鸡	<i>Crex crex</i>		II
姬田鸡	<i>Porzana parva</i>		II
棕背田鸡	<i>Porzana bicolor</i>		II
花田鸡	<i>Coturnicops noveboracensis</i>		II
鸨科	Otidae		
鸨 (所有种)	<i>Otis spp.</i>	I	
形鸨目	CHARADRIIFORMES		
雉鸨科	Jacanidae		
铜翅水雉	<i>Metopidius indicus</i>		II
鹬科	Scolopacidae		
小勺鹬	<i>Numenius borealis</i>		II
小青脚鹬	<i>Tringa guttifer</i>		II
燕鸨科	Glareolidae		
灰燕鸨	<i>Glareola lactea</i>		II
鸥形目	LARIFORMES		
鸥科	Laridae		
遗鸥	<i>Larus relictus</i>	I	
小鸥	<i>Larus minutus</i>		II
黑浮鸥	<i>Chlidonias niger</i>		II
黄嘴河燕鸥	<i>Sterna aurantia</i>		II
黑嘴端凤头燕鸥	<i>Thalasseus zimmermanni</i>		II
爬行纲 REPTILIA			
龟鳖目	TESTUDIFORMES		
龟科	Emydidae		
*地龟	<i>Geoemyda spengleri</i>		II
*三线闭壳龟	<i>Cuora trifasciata</i>		II
*云南闭壳龟	<i>Cuora yunnanensis</i>		II
陆龟科	Testudinidae		
四爪陆龟	<i>Testudo horsfieldi</i>	I	
凹甲陆龟	<i>Manouria impressa</i>		II

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
海龟科	Cheloniidae		
*蠵龟	<i>Caretta caretta</i>		II
*绿海龟	<i>Chelonia mydas</i>		II
*玳瑁	<i>Eretmochelys imbricata</i>		II
*太平洋丽龟	<i>Lepidochelys olivacea</i>		II
棱皮龟科	Dermochelyidae		
*棱皮龟	<i>Dermochelys coriacea</i>		II
鳖科	Trionychidae		
*鼋	<i>Pelochelys bibroni</i>	I	
*山瑞鳖	<i>Trionyx steindachneri</i>		II
鳄目	CROCODILIFORMES		
鼈科	Alligatoridae		
扬子鳄	<i>Alligator sinensis</i>	I	
两栖纲 AMPHIBIA			
有尾目	CAUDATA		
隐鳃鲵科	Cryptobranchidae		
*大鲵	<i>Andrias davidianus</i>		II
无尾目	ANURA		
蛙科	Ranidae		
虎纹蛙	<i>Rana tigrina</i>		II
鱼纲 PISCES			
鲈形目	PERCIFORMES		
石首鱼科	Sciaenidae		
*黄唇鱼	<i>Bahaba flavolabiata</i>		II
杜父鱼科	Cottidae		
*松江鲈鱼	<i>Trachidermus fasciatus</i>		II
海龙鱼目	SYNGNATHIFORMES		
海龙鱼科	Syngnathidae		
*克氏海马鱼	<i>Hippocampus kelloggi</i>		II
鲤形目	CYPRINIFORMES		
胭脂鱼科	Catostomidae		
*胭脂鱼	<i>Myxocyprinus asiaticus</i>		II
鲤科	Cyprinidae		
*唐鱼	<i>Tanichthys albonubes</i>		II
*大头鲤	<i>Cyprinus pellegrini</i>		II

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
*金钱鲃	<i>Sinocyclocheilus grahami grahami</i>		II
*新疆大头鱼	<i>Aspiorhynchus laticeps</i>	I	
*大理裂腹鱼	<i>Schizothorax taliensis</i>		II
鳗鲡目	ANGUILLIFORMES		
鳗鲡科	Anguillidae		
*花鳗鲡	<i>Anguilla marmorata</i>		II
鲑形目	SALMONIFORMES		
鲑科	Salmonidae		
*川陕哲罗鲑	<i>Hucho bleekeri</i>		II
*秦岭细鳞鲑	<i>Brachymystax lenok tsinlingensis</i>		II
鲟形目	ACIPENSERIFORMES		
鲟科	Acipenseridae		
*中华鲟	<i>Acipenser sinensis</i>	I	
*达氏鲟	<i>Acipenser dabryanus</i>	I	
匙吻鲟科	Polyodontidae		
*白鲟	<i>Psephurus gladius</i>	I	
文昌鱼纲 APPENDICULARIA			
文昌鱼目	AMPHIOXIFORMES		
文昌鱼科	Branchiostomatidae		
*文昌鱼	<i>Branchiotoma belcheri</i>		II
腹足纲 GASTROPODA			
中腹足目	MESOGASTROPODA		
宝贝科	Cypraeidae		
*虎斑宝贝	<i>Cypraea tigris</i>		II
冠螺科	Cassididae		
*冠螺	<i>Cassis cornuta</i>		II
瓣鳃纲 LAMELLIBRANCHIA			
异柱目	ANISOMYARIA		
珍珠贝科	Pteriidae		
*大珠母贝	<i>Pinctada maxima</i>		II
真瓣鳃目	EULAMELLIBRANCHIA		
砗磲科	Tridacnidae		
*库氏砗磲	<i>Tridacna cookiana</i>	I	
蚌科	Unionidae		
*佛耳丽蚌	<i>Lamprotula mansuyi</i>		II

中 名	学 名	保护级别	
		I 级	II 级
肠鳃纲 ENTEROPNEUSTA			
柱头虫科	Balanoglossidae		
*多鳃孔舌形虫	<i>Glossobalanus polybranchioporus</i>	I	
玉钩虫科	Harrimaniidae		
*黄岛长吻虫	<i>Saccoglossus hwangtauensis</i>	I	

注：标“*”者，由渔业行政主管部门主管；未标“*”者，由林业行政主管部门主管。此物种名录主要参考《国家重点保护野生动物名录》及《〈濒危野生动植物种国际贸易公约〉附录水生动物物种核准为国家重点保护野生动物名录》。

推荐性引用附录B

水生生物调查采样方法

B.1 水生生物类群

水生生物类群主要包括：浮游植物、浮游动物和底栖动物，水生生物是水生态系统的重要组成部分，可以提供重要的生态系统服务，而且对水生态环境变化具有明显的指示作用，能够及时反映人类活动对生态系统的影响。

(1) 浮游动物 **Zooplankton**

在水中营浮游生活的动物类群。完全没有游泳能力，或游泳能力微弱，不能作远距离的移动，也不足以抵抗水的流动力。淡水浮游动物主要包括原生动物、轮虫、枝角类、桡足类等类群。

(2) 浮游植物 **Phytoplankton**

水中营浮游生活的藻类，属于微藻类，广泛存在于河流、湖泊和海洋中。淡水浮游藻类主要包括蓝藻、绿藻、硅藻、裸藻、甲藻、金藻、黄藻和隐藻八个类群。

(3) 底栖动物 **Benthic Invertebrate**

指生活史的全部或大部分时间生活于水体底部的水生动物类群，主要包括水栖寡毛类、软体动物和水生昆虫幼虫等。为了研究方便，将不能通过 500 μm 孔径筛网的底栖动物称为大型底栖动物，将能通过 500 μm 孔径筛网但不能通过 42 μm 孔径筛网的底栖动物称为小型底栖动物，将能通过 42 μm 孔径筛网的底栖动物称为微型底栖动物。

(4) 鱼类 Fish

身体覆被骨鳞、以鳃呼吸、通过尾部和躯干部的摆动以及鳍的协调作用游泳和凭上下颌摄食的变温水生脊椎动物。

(5) 大型水生植物 Aquatic macrophyte

除小型藻类以外所有的水生植物类群，植物的一部分或全部永久地或一年中数月沉没于水中或漂浮于水面上的高等植物类群。

B.2 浮游植物

(1) 定量样品采集

使用竖式采水器进行定量采集 1L 水样。水深 < 2m 时，不分层，在水体表层下 0.5m 采集；水深为 2m~5m 时，分别在表层下 0.5m、底层上 0.5m 各采集一次；水深 > 5m 时，则在表层下 0.5m 处、中层以及底层上 0.5m 处各采集一次。贫营养状态水体中可酌情增加采样体积。

(2) 定性样品采集

浮游植物定性样品的采集应在定量样品采集结束后进行。用国际标准的 13 号或 25 号浮游生物网，在选定的采样点于水面下 0.5m 深处以每秒 20cm~30cm 的速度作“∞”形循环缓慢拖动，拖动时间至少 5 分钟，以此来定性采集浮游植物。遇较大水体时，可把浮游生物网拴在船尾，以慢速拖拽，时间至少为 10 分钟。

水样采集完毕，将网从水中提出，待水滤去，轻轻打开集中杯的活栓，使水样流入样品瓶中。

(3) 样品的固定与保存

样品中加入 5%鲁哥氏液或 5%甲醛溶液进行固定；对用于分析叶绿素 a 的样品，则不对样品作防腐处理。

将样品带回实验室，常温保存；确认样品按正确方法装载，使样品不致泄漏。保存时，每隔几周检查防腐剂，必要时进行添加，直至完成种类鉴定。（注意：测试叶绿素指标的样品需放入冷冻箱带回实验室，保存于黑暗处，直至处理。）

(4) 标识与记录

将永久性标签放于样品瓶内，附以下信息：采样地点、点位编号、日期、采集人姓名、固定液类型（注意：鲁哥氏液或其他碘固定液会使纸质标签变黑）。同时，在样品瓶外侧标注采样地点、点位编号、日期与样品类型。

在野外记录本或现场采样记录表中记录下湖库名称、采样位置、点位编码、采样日期、采集人姓名、采样方法及相关的生态信息。采样完成后，在浮游植物样品登记表中记录下样品信息，方便核对。

B.3 浮游动物

(1) 定量样品采集

使用竖式采水器进行定量采集，采水层次同浮游植物。小型浮游动物（原生动物、轮虫以及未成熟的微小甲壳动物）采水样 1L；大型浮游动物（成熟的甲壳动物）采水样 10L~50L。

小型浮游动物水样，可直接装入样品瓶；大型浮游动物水样，用 13 号浮游生物网将水样过滤后，转移至样品瓶中，并用清水冲洗浮游生物网，将所得过滤物并入样品瓶中。

(2) 定性样品采集

浮游动物定性样品的采集应在定量样品采集结束后进行，使用 13 或 25 号浮游生物网，方法同浮游植物定性样品采集方法。值得注意的是，定性网（即采集定性样品所使用的浮游生物网）与过滤网（即过滤定量样品所使用的浮游生物网）应分别使用不同的网，并防止混用。

(3) 样品的固定与保存

固定：样品中加入 5% 甲醛溶液进行固定。

保存：将样品带回实验室，常温保存。确认样品按正确方法装载，使样品不致泄漏。保存时，每隔几周检查固定液，必要时进行添加，直至样品分析。

(4) 标识与记录

标识：将永久性标签放于样品瓶内，附以下信息：采样地点、点位编号、日期、采集人姓名、固定液类型。同时，在样品瓶外侧标注采样地点、点位编号、日期与样品类型。

记录：在野外记录本或浮游动物现场采样记录表中记录下湖库名称、采样位置、点位编码、采样日期、采集人姓名、采样方法及相关的生态信息。采样完成后，在浮游动物样品登记表中记录下样品信息，方便核对。

B.4 大型底栖动物

(1) 样品采集

可以根据监测点位的实际情况以及投入的人力物力来选择适宜的大型底栖动物采集工具和相应的采集方法。底质以淤泥为主的平原湖库，可采用彼得逊采泥器进行采集；底质以砂砾（甚至碎石）为主的湖道型湖库

（或其他类型湖库），用彼得逊采泥器效果不佳，可采用手抄网进行采集。此处优先推荐天然基质采样，如果环境条件不适于天然基质采样，可以选择人工基质；另外，如果监测的目的仅是为了评价化学水质而非物理生境，也可以采用人工基质。

i.天然基质法——彼得逊采泥器

使用彼得逊采泥器采集底泥，每个监测点位至少取 2 个重复位点，每个重复位点采集 2 斗，如遇硬质底泥，则在相同断面内更换软质底泥点进行采样。

采集的样本用 500 μm 孔径分样筛去除泥砂，当泥砂量大时，可采用大型分样筛和直流水泵进行淘洗，挑出其中的大型底栖动物样品。具有典型生态意义的样品，应拍照、观察并记录。

采样结束后，可将样品按个体大小、软硬分别装瓶（避免损坏），贴上标签。检查筛网上的残余物，用清水冲洗干净。

ii.天然基质法——手抄网

沿着湖岸选择 100m 范围（水深不超过 1m），并在其中等距设置 10 个重复采样位点。每次采样，固定抄网位置，网口面朝水流方向，用足尖、足跟搅乱抄网向上 0.5m 范围内的底质。如遇较大的石块，可用手捡起，剥离其上附着的生物。每采集 2~3 次，在流水中冲洗网中采集到的样品。如果出现网眼堵塞的情况，将网内采集到的样品丢弃，重新在该重复位点附近其他位置采集样品。

如果水流较缓或水深较深，可以采用拖曳方式按“弓”字形采集湖底底质，采集厚度为 10cm，每个重复位点的采集距离为 0.5m。另外，如果采样位点有大型水生植物，也可以用拖曳方式在植物根茎上采集。

将采集的样本用 500 μm 孔径分样筛去除泥砂，当泥砂量大时，可采用大型分样筛和直流水泵进行淘洗，挑出其中的大型底栖动物样品。具有典型生态意义的样品，应拍照、观察并记录。

采样结束后，可将样品按个体大小、软硬分别装瓶（避免损坏），贴上标签。检查抄网上的残余物，用清水冲洗干净。

iii.人工基质法——岩石笼或多片采样器

将人工基质笼放入监测点位的水底，每个点位至少设 2 个放置点，每个点至少放置 2 个人工基质。

2 周后，将人工基质笼从水底取出，用 500 μm 孔径分样筛去除泥砂，挑出其中的大型底栖动物样品。具有典型生态意义的样品，应拍照、观察并记录。

将样品按个体大小、软硬分别装瓶（避免损坏），贴上标签。检查筛网上的残余物，用清水冲洗干净。

(2) 样品的固定与保存

固定：样品中加入 75%乙醇或 5%甲醛溶液进行固定。

保存：将样品带回实验室，常温保存。确认样品按正确方法装载，使样品不致泄漏。保存时，每隔几周检查固定液，必要时进行添加，直至样品分析。

(3) 标识与记录

标识：将永久性标签放于样品瓶内，附以下信息：采样地点、点位编号、日期、采集人姓名、固定液类型。同时，在样品瓶外侧标注采样地点、点位编号、日期与样品类型。

记录：在野外记录本或大型底栖动物现场采样记录表中记录下河湖名称、采样位置、点位编码、采样日期、采集人姓名、采样方法及相关的生态信息。采样完成后，在大型底栖动物样品登记表中记录下样品信息，方便核对。

B.5 鱼类动物

B.5.1 野外采样

鱼类调查，除结冰期外，全年均可进行，特别是夏末和初秋。鱼类为游泳速度很快的脊椎动物，既有分散性，又有群居性，很难获得，需用科学的方法，持续几年进行系统调查。可在与其它水生物一起调查过程中，观察、采样，鉴定、记录其种类组成和生长状况，并结合查阅文献、访问相关部门及人员（当地渔业部门、水产协会、水务部门、当地渔民），收集该水域鱼类的基础资料，以便探讨鱼类种群、数量的变化与水质、水环境的关系。

(1) 样本的采集和鉴定

用网具适量（够用即可，尽量少捕）采集调查水体自然生长的各种鱼类样本，对样本进行拍照、测定组织残留。

(2) 固定和保存

在没有条件及时处理标本时，将采集到的标本放入体积适宜的标本瓶（箱），用5%福尔马林水溶液固定、保存。如鱼体较大，还需往腹腔内均匀注射10%福尔马林水溶液，而后固定、保存。容易掉鳞的鱼、稀有种类和小规格种类要用纱布包起来再放入固定液中。标本瓶上贴好标签，注明水体名称、采集时间。带回实验室，置于冰箱（4℃）内或阴凉处暂存，2周内完成鉴定，测量。

B.5.2 鱼类标本的鉴定与测量

所采标本应鉴定到种或亚种，记录中文名、拉丁学名、数量（尾数）和生境，并测量鱼类生物学指标，如全长、体长、头长、体重、性别等。对测定数据作统计学分析，求出各种形状鱼的大小比例和变动范围。

B.6 大型水生植物

B.6.1 定性样品的采集和鉴定

根据调查水体（河流、湖泊）的形态、水文情况和植物的分布等选择有代表性的采样样方（水生植物的密集区、一般区、稀疏区应都有代表性样方），拍摄群落全貌照片，并尽量拍样方垂直投影照片。定性样品主要采集水深在 6m 以内生长的大型水生植物种类，带回实验室进行分类鉴定，鉴定到种或亚种。生长在水中的禾本科、香蒲科、莎草科、蓼科等挺水植物可直接用手采集；浮叶植物可用耙子连根拔起；漂浮植物可直接用带柄的手网采集；沉水植物可用耙子或拖钩采集。尽量选择带有茎、叶、花和果实的植物体作为标本，将新采到的不同种类标本，经鉴定后保存。每采集一种植物必须立即作好采集记录，贴上采集标签，记录中文和拉丁种名、科属名和生境特征。

B.6.2 定量样品的采集和测定

水体调查断面可设置 1~3 个带状调查区，河流型调查区垂直于河流流向，包含河流两岸和水体；湖库型水体沿岸带调查区应垂直于湖（库）岸线，湖库敞水带可先选定调查点，以调查点为中心点布置十字交叉形调查区。调查区宽度 5m~10m，每个调查区布置 3~6 个样方，样方面积 $0.25\text{ m}^2\sim 3\text{ m}^2$ ，考虑到植被群落结构变异性，长方形样方更为有效，样方形状根据调查情况确定。将选取的样方用样方框围好，把样方（ $0.25\text{ m}^2\sim 3\text{ m}^2$ ）

范围的全部植物从基部割断，分种类称重。挺水植物可用 1m^2 采样方框采集，从植物基部割取，沉水植物、浮叶植物、漂浮植物用水草定量夹 (0.25m^2) 采集。将采集植物体洗净，装入已编号的样品袋内，带回实验室。在室内取出袋内植物，去除根、枯枝、败叶和其它杂质，去除植物体多余的水分，鉴定种类，分种称重 (G_1 ，单位：g)，最后换算出每平方米内各种大型水生植物的鲜重 (湿重)。

干重测定：取某种植物的部分新鲜样品 (不得少于该种样品总量的 10%)，用天平准确称重，为子样品鲜重 (G_3)。将子样品在 80°C 鼓风干燥箱内烘干，直至恒重，即为子样品的干重 (G_2)。计算公式如下：

$$G = G_1 \times \frac{G_2}{G_3} \quad (\text{B.6-1})$$

式中， G 为样品干重，单位 g； G_1 为样品鲜重，单位 g； G_2 为子样品干重，单位 g； G_3 为子样品鲜重，单位 g。

根据样方内各类植物的生物量 (鲜重或干重) 和它们的分布面积，估算出该水体大型水生植物的总生物量和各类植物所占比例，并记录测定结果。

推荐性引用附录C

特征污染物模拟常用数学模型基本方程及其适用条件

C.1 可溶性污染物

a. 河流

① 河流零维水质模型：

$$C = \frac{C_P \cdot Q_P + C_E \cdot Q_E}{Q_P + Q_E} \quad (\text{C.1-1})$$

式中， C 为完全混合的水质浓度（mg/L）； Q_P 、 C_P 分别为上游来水水量（ m^3/s ）与本底水质浓度（mg/L）； Q_E 、 C_E 分别为污水流量（ m^3/s ）与污染物排放浓度（mg/L）。

适用范围：混合均匀的小型河流、沟渠，可用于非降解类污染物在小型天然河道及沟渠内的沿程水质模拟。

资料需求：水环境事件上游河流流量和水中污染物本底浓度、污染物排放量和排放浓度。

② 河流一维恒定流水质模型：

$$C(x) = C_0 \exp\left(-\frac{K_1 x}{u}\right) \quad (\text{C.1-2})$$

$$C_0 = \frac{W_0}{Q} \quad (\text{C.1-3})$$

式中， $C(x)$ 为河段排放点下游 x 处的污染物浓度（mg/L）； u 为河段平均水流流速（m/s）； K_1 为特征污染物的一级降解系数（ s^{-1} ）； x 为沿流程的距离（m）； W_0 为事件发生地点（ $x=0$ 处）的特征污染物排放源强（mg/s）； Q 为河段流量（ m^3/s ）。

适用范围：河道断面较为规则、横断面水流流速分布较为均匀的中小型河流水质模拟，常用于突发水环境事件应急处置及预警预报中。

资料需求：突发水环境事件河段流量、河段平均流速、特征污染物排放源强、特征污染物一级降解系数、河段流程环境敏感点距离事件发生点的水流流程距离。

③ 一维非恒定水质模型：

一维非恒定水动力学模型的基本方程（圣维南方程）为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) &= -gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{n^2 u |u|}{h^{4/3}} \right) \end{aligned} \quad (\text{C.1-4})$$

式中，A、Q、Z 分别为过水面积（m²）、流量（m³/s）、水位（m）；q 为河流区间入流或分流量（m²/s）；n 为河道糙率；u 为断面平均流速；h 为断面水深。

一维非恒定水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(uAC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + Af(C) + r \quad (\text{C.1-5})$$

式中，u 为断面平均流速（m/s）；C 为某种污染物的断面平均浓度（g/m³）；D_x 为污染物纵向离散系数（m²/s）；A 为断面面积（m²）；f(C) 为生化反应项（g/(m³·s)）；r 为污染物排放源强（g/(m·s)）。

边界条件：上游边界条件一般采用流量过程，下游边界条件为水位过程或者水位流量关系。水质数学模型上游边界条件为浓度过程，下游边界条件可以根据实际条件确定。

初始条件：一般根据初始时刻边界的流量作为恒定流，推求河道的水面线、流速和过流面积，作为计算的初始条件，或者根据已知若干点的

水位计算各个断面的水位、流速和过流面积作为初始值。浓度初值一般设定为 0，也可以采用实测浓度作为初值。

方程解法：当水体的水流及边界条件比较简单时，可以求得方程的解析解，多数情况下应采用数值解，包括有限差分法、有限体积法等，数值离散可以采用显格式以及隐格式。

适用范围：宽度和深度相对于纵向长度都显著小的河流和渠道。

资料需求：突发水环境事件河段流量、水位、河道糙率、水质、河道地形、污染物一级降解系数、特征污染物排放强度、污染物扩散系数等。

④ 平面二维数值模型

采用平面二维数学模型计算垂向平均的水流和水质因素在平面的变化，平面二维非恒定水流模型的基本方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= q \\ \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial x} &= -g \frac{n^2u}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} + 2h\theta v \sin \varphi + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial y} &= -g \frac{n^2v}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - 2h\theta u \sin \varphi + \frac{1}{\rho} \tau_{wy} \end{aligned} \quad (\text{C.1-6})$$

式中， Z 为水位； u 、 v 分别为 x 与 y 方向上的流速（m/s）； h 为水深（m）； q 为考虑降雨等因素的源（汇）项（m/s）； g 为重力加速度（m/s²）； n 为糙率； θ 为地球自转角速度； φ 为当地纬度； τ_{wx} 、 τ_{wy} 分别为风应力沿 x 和 y 方向的分量，可采用如下公式计算：

$$\begin{cases} \tau_{wx} = \rho_a c_D |W| W_x \\ \tau_{wy} = \rho_a c_D |W| W_y \end{cases} \quad (\text{C.1-7})$$

式中, ρ_a 为空气密度; c_D 为阻力系数; W 为离水面 10m 高处的风速 (m/s); W_x 、 W_y 分别为 W 沿 x 和 y 方向的分量。

平面二维非恒定水质数学模型的基本方程为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S + hf(C) \quad (C.1-8)$$

式中, h 为水深 (m); C 为某种污染物浓度 (mg/L); D_x , D_y 分别为纵向及横向紊动扩散系数 (m^2/s); S 为源 (汇) 项 ($g/(m^2 \cdot s)$); $f(C)$ 为污染物生化反应项 ($g/(m^3 \cdot s)$)。

边界条件: 固体边界法向速度为 0, 开边界 (水边界) 采用水位以及流量过程作为边界条件。水质计算在固边界的浓度法向梯度为 0, 水边界根据实际条件确定。

初始条件: 一般把初始时刻边界上相应的水位作为计算网格点的初始水位, 初始流速和浓度初值一般设定为 0, 也可以根据已知点流速和浓度进行差值, 把得到的流速及浓度分布作为初值, 以缩短计算收敛的时间。

方程解法: 当水体的水流及边界条件比较简单时, 可以求得方程的解析解, 多数情况下应采用数值解, 包括有限差分法、有限元法、有限体积法等, 时间离散可以采用显格式、隐格式、半隐格式, 根据评价区域的平面形态, 计算网格可以采用结构化网格、非结构化网格和动态网格。

适用范围: 水体宽度显著大于垂向深度的河流和渠道。

资料需求: 突发水环境事件河段流量、水位、河道糙率、水质、河道地形、特征污染物排放强度、特征污染物一级降解系数、特征污染物扩散系数等。

⑤ 立面二维数学模型

描述立面二维水流运动的方程组为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial(Bu)}{\partial t} + \frac{\partial(Bu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (BA_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BA_z \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\tau_{wx}}{\rho} \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g &= 0 \end{aligned} \quad (C.1-9)$$

式中， u 、 w 分别为水平和垂直方向的流速分量（m/s）； B 为宽度（m）； P 为压力； ρ 为水体密度（kg/m³）； A_h 、 A_z 分别为水平方向和垂直方向的涡粘性系数； τ_{wx} 为边壁阻力； g 为重力加速度（m/s²）。

立面二维水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (BuC) + \frac{\partial}{\partial z} (BwC) = \frac{\partial}{\partial x} (BD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BD_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + Bf(C) \quad (C.1-10)$$

式中， C 为某种污染物浓度（mg/L）； D_x 、 D_z 分别为横向以及垂向上的紊动扩散系数（m²/s）； S 为源（汇）项（g/(m²·s)）； $f(C)$ 为污染物反应项（g/(m³·s)）。

边界条件：水流计算中的上下游边界分别根据相应流量确定，底部可以根据床面阻力与流速的关系给定边界条件（滑移边界条件），或者认为底部切向流速等于 0（无滑移边界条件）。水质计算中的上游边界采用污染物浓度过程，下游边界根据实际条件确定，水面浓度梯度等于 0。

初始条件：一般设定初始时刻流速和浓度为 0，也可以根据实测值进行插值，得到流速及浓度分布作为初值。

方程解法：一般采用数值解，包括有限差分法、有限元法、有限体积法等。

适用范围：水体宽度比较窄，流速、水温或污染物在深度方向上分布具有明显差异的河流和渠道。

资料需求：突发水环境事件河段流量、水位、河道糙率、水质、河道地形、特征污染物排放强度、特征污染物一级降解系数、特征污染物扩散系数等。

⑥ 三维数学模型

描述三维水流运动的方程组为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial u}{\partial z}) + 2\theta v \sin \varphi \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial v}{\partial z}) - 2\theta u \sin \varphi \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.1-11})$$

式中， u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量（ m/s ）； P 为压力； ρ 为水体密度（ kg/m^3 ）； A_h 、 A_z 为水平方向和垂直方向的涡粘性系数； θ 为地球自转角速度； Φ 为当地纬度； g 为重力加速度（ m/s^2 ）。

三维水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + f(C) \quad (\text{C.1-12})$$

式中， C 为某种污染物浓度（ mg/L ）； D_x ， D_y ， D_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的紊动扩散系数（ m^2/s ）； S 为源（汇）项（ $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ）； $f(C)$ 为污染物生化反应项（ $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ）。

三维数学模型大多采用 σ 坐标变换, 即:

$$\sigma = (z - \zeta) / H$$

式中, z 、 ζ 、 H 分别为笛卡尔坐标系下的垂向坐标、自由水面水位和水深, 经过变换的计算域在垂向上处于 0 和 -1 之间, 为网格划分和数值离散带来了方便。

边界条件: 在自由水面上, 根据表面风应力与流速的关系给定边界条件, 在底部, 一般根据床面阻力与流速的关系给定边界条件 (滑动边界条件), 如果靠近床面布置比较细的网格, 也可以给定无滑动边界条件。

方程解法: 三维模型的空间离散, 可以采用有限差分法、有限元法或者有限体积法, 时间离散可以采用显格式、隐格式、半隐格式以及时间分步, 根据评价区域的平面、床面形态, 计算网格可以采用结构化网格、非结构化网格和动态网格。

适用范围: 水深较大, 或者需要进行排放口近区精细分析的河流和渠道。

资料需求: 突发水环境事件河段流量、水位、河道糙率、水质、河道地形、特征污染物排放强度、特征污染物一级降解系数、特征污染物扩散系数等。

b. 湖库

① 零维均匀混合模型

$$C = \frac{W}{Q + kV} \quad (\text{C.1-13})$$

式中， C 为完全混合的水中污染物浓度（mg/L）； W 为单位时间污染物排放量（g/s）； Q 为水量平衡时流入与流出湖库的流量（m³/s）； k 为污染物综合衰减系数，（s⁻¹）； V 为水体体积（m³）。

适用范围：混合均匀的小型湖泊和水库。

资料需求：出入库流量、特征污染物排放量、特征污染物综合衰减系数、湖库水体体积。

② 平面二维数值模型

平面二维非恒定水流模型的基本方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= q \\ \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial x} &= -g \frac{n^2 u}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} + 2h\theta v \sin \varphi + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial y} &= -g \frac{n^2 v}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - 2h\theta u \sin \varphi + \frac{1}{\rho} \tau_{wy} \end{aligned} \quad (C.1-14)$$

式中， Z 为水位； u 、 v 分别为 x 与 y 方向上的流速（m/s）； h 为水深（m）； q 为考虑降雨等因素的源（汇）项（m/s）； g 为重力加速度（m/s²）； n 为糙率； θ 为地球自转角速度； φ 为当地纬度； τ_{wx} 、 τ_{wy} 分别为风应力沿 x 和 y 方向的分量，可采用如下公式计算：

$$\begin{cases} \tau_{wx} = \rho_a c_D |\bar{W}| W_x \\ \tau_{wy} = \rho_a c_D |\bar{W}| W_y \end{cases} \quad (C.1-15)$$

式中， ρ_a 为空气密度； c_D 为阻力系数； \bar{W} 为离水面 10m 高处的风速（m/s）； W_x 、 W_y 分别为 W 沿 x 和 y 方向的分量。

平面二维非恒定水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S + hf(C) \quad (\text{C.1-16})$$

式中， h 为水深 (m)； C 为某种污染物浓度 (mg/L)； D_x ， D_y 分别为纵向及横向紊动扩散系数 (m^2/s)； S 为源 (汇) 项 ($g/(m^2 \cdot s)$)； $f(C)$ 为污染物生化反应项 ($g/(m^3 \cdot s)$)。

边界条件：固边界法向速度为 0，开边界（水边界）采用水位以及流量过程作为边界条件。水质计算在固边界的法向梯度浓度为 0，水边界根据实际条件确定。

初始条件：一般把初始时刻边界上相应的水位作为计算网格点的初始水位，初始流速和浓度初值一般设定为 0，也可以根据已知点流速和浓度进行差值，把得到的流速及浓度分布作为初值，以缩短计算收敛的时间。

方程解法：当水体的水流及边界条件比较简单时，可以求得方程的解析解，多数情况下应采用数值解，包括有限差分法、有限元法、有限体积法等，时间离散可以采用显格式、隐格式、半隐格式，根据评价区域的平面形态，计算网格可以采用结构化网格、非结构化网格和动态网格。

适用范围：水体宽度显著大于垂向深度的湖泊和水库。

资料需求：突发水环境事件湖（库）区流量、水位、河道糙率、水质、湖库水下地形、特征污染物一级降解系数、特征污染物排放强度、特征污染物扩散系数等。

③ 立面二维数学模型

如果评价区域水体宽度比较窄，流速、水温或污染物在深度方向上分布具有明显差异，如垂向有回流旋涡、密度分层等，可以采用立面二维模型，描述水流运动的方程组为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial(Bu)}{\partial t} + \frac{\partial(Bu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (BA_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BA_z \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\tau_{wx}}{\rho} \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g &= 0 \end{aligned} \quad (C.1-17)$$

式中， u 、 w 分别为水平和垂直方向的流速分量（m/s）； B 为宽度（m）； P 为压力； ρ 为水体密度（kg/m³）； A_h 、 A_z 分别为水平方向和垂直方向的涡粘性系数； τ_{wx} 为边壁阻力； g 为重力加速度（m/s²）。

立面二维水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (BuC) + \frac{\partial}{\partial z} (BwC) = \frac{\partial}{\partial x} (BD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BD_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + Bf(C) \quad (C.1-18)$$

式中， C 为某种污染物浓度（mg/L）； D_x ， D_z 分别为横向以及垂向上的紊动扩散系数（m²/s）； S 为源（汇）项（g/(m²·s)）； $f(C)$ 为污染物反应项（g/(m³·s)）。

边界条件：水流计算上下游边界分别根据相应流量确定，底部可以根据床面阻力与流速的关系给定边界条件（滑移边界条件），或者认为底部切向流速等于 0（无滑移边界条件）。水质计算上游边界采用污染物浓度过程，下游边界根据实际条件确定，水面浓度梯度等于 0。

初始条件：一般设定初始时刻流速和浓度为 0，也可以根据实测值进行插值，得到流速及浓度分布作为初值。

方程解法：一般采用数值解，包括有限差分法、有限元法、有限体积法等。

适用范围：水体宽度比较窄，流速、水温或污染物在深度方向上分布具有明显差异的湖泊和水库。

资料需求：突发水环境事件湖（库）区流量、水位、河道糙率、水质、河道地形、特征污染物一级降解系数、特征污染物排放强度、特征污染物扩散系数等。

④三维数学模型

描述三维水流运动的方程组为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial u}{\partial z}) + 2\theta v \sin \varphi \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial v}{\partial z}) - 2\theta u \sin \varphi \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.1-19})$$

式中， u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量（ m/s ）； P 为压力； ρ 为水体密度（ kg/m^3 ）； A_h 、 A_z 分别为水平方向和垂直方向的涡粘性系数； θ 为地球自转角速度； Φ 为当地纬度； g 为重力加速度（ m/s^2 ）。

三维水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + f(C) \quad (\text{C.1-20})$$

式中， C 为某种污染物浓度（mg/L）； D_x ， D_y ， D_z 分别为x、y、z方向上的紊动扩散系数（ m^2/s ）； S 为源（汇）项（ $g/(m^3 \cdot s)$ ）； $f(C)$ 为污染物生化反应项（ $g/(m^3 \cdot s)$ ）。

三维数学模型大多采用 σ 坐标变换，即：

$$\sigma = (z - \zeta) / H \quad (C.1-21)$$

式中， z 、 ζ 、 H 分别为笛卡尔坐标系下的垂向坐标、自由水面水位和水深，经过变换的计算域在垂向上处于0和-1之间，为网格划分和数值离散带来了方便。

边界条件：在自由水面上，根据表面风应力与流速的关系给定边界条件，在底部，一般根据床面阻力与流速的关系给定边界条件（滑移边界条件），如果靠近床面布置比较细的网格，也可以给定无滑移边界条件。

方程解法：三维模型的空间离散，可以采用有限差分法、有限元法或者有限体积法，时间离散可以采用显格式、隐格式、半隐格式以及时间分步，根据评价区域的平面、床面形态，计算网格可以采用结构化网格、非结构化网格和动态网格。

适用范围：水深较大，或者需要进行排放口近区精细分析的湖泊和水库。

资料需求：突发水环境事件湖（库）区流量、水位、河道糙率、水质、湖库水下地形、特征污染物一级降解系数、特征污染物排放强度、特征污染物扩散系数等。

C.2 易挥发类污染物

① Whitman 气液两相模型

描述气液两相模型的方程组为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{COND} \frac{A_s}{V} \cdot f_d \cdot C - K_v C \quad (\text{C.2-1})$$

式中， C 为水中挥发性污染物的浓度； COND 为通过小段水体污染物的传导系数； A_s 为小段水体的表面积； V 为小段水体的体积； f_d 为溶解态污染物所占比例； K_v 为挥发速率常数。

② WASP 模型

描述方程组为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{K_v}{D} \left(f_d C - \frac{C_a}{\frac{H}{RT_k}} \right) \quad (\text{C.2-2})$$

式中， K_v 为转换速率， m/d ； D 为河段水深， m ； f_d 为溶解态污染物所占比例； C_a 为大气中污染物浓度， ug/L ； R 为通用气体常数（摩尔气体常数）， 8.206 atm/mol ； T_k 为水体温度， K ； H 为挥发性污染物在气液界面分区中的亨利定律系数， atmm^3/mol 。

③ 一维水质预测模型

一维基本方程组为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = \left[u_x C + \left(-D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \Delta y \Delta z - k C \Delta x \Delta y \Delta z - \left[u_x C + \frac{\partial u_x C}{\partial x} \Delta x + \left(-D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Delta x \right] \Delta y \Delta z \quad (C.2-3)$$

在均匀流场中， u_x 和 D_x 都可以作为常数，将上式简化，并令 $\Delta x \rightarrow 0$ ，得：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - kC \quad (C.2-4)$$

式中， C 为污染物的浓度，它是时间 t 和空间位置 x 的函数； D_x 为纵向弥散系数； u_x 为断面平均流速； K 为污染物的衰减速度常数。

④ 一维流场瞬时点源排放的迁移扩散模型

考虑弥散作用，即 $D_x \neq 0$ ，则一维基本方程（C.2-5）可以通过拉普拉斯变换及其逆变换求解。相应的初始条件为 $L(0, s) = C_0$ 和 $L(\infty, s) = 0$ ，则：

$$C(x, t) = \frac{u_x C_0}{\sqrt{4\pi D_x t}} \exp \left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} \right] \exp(-kt) \quad (C.2-5)$$

式中， C_0 为起点浓度，在挥发性污染物瞬时排放时， $C_0 = \frac{M}{Q}$ ， $Q = Au_x$ ，则：

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp \left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} \right] \exp(-kt) \quad (C.2-6)$$

式中， M 为挥发性污染物瞬时投加量； A 为河流断面面积。

⑤ 二维水质预测模型

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_y \frac{\partial C}{\partial y} - kC \quad (\text{C.2-7})$$

式中， C 为某种污染物浓度（mg/L）； u_x 、 u_y 分别为 x 、 y 方向的速度分量； D_x 为源（汇）项（ $g/(m^2 \cdot s)$ ）； k 为污染物综合衰减系数， s^{-1} 。

⑥ 二维流场瞬时点源排放的迁移扩散模型

假定所研究的二维平面是 x 、 y 平面，在无边界阻碍的情况下，边界条件为：当 $y = \pm\infty$ 时， $\frac{\partial C}{\partial y} = 0$ 。这时瞬时点源二维模型的迁移扩散模型见式 C.2-8。

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4u_x h \sqrt{D_x D_y t^2}} \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(y - u_y t)^2}{4D_y t} \right] \exp(-Kt) \quad (\text{C.2-8})$$

式中， u_y 表示 y 方向的速度分量； D_y 表示 y 方向的弥散系数； h 表示平均扩散深度；其余符号意义同前。

如果挥发性污染物的扩散受到边界的影响，需要考虑边界的反射作用。此时二维流场的迁移扩散模型见式 C.2-9。

$$C(x, y, t) = \frac{M \exp(-Kt)}{4u_x h \sqrt{D_x D_y t^2}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(y - u_y t)^2}{4D_y t} \right] + \exp \left[-\frac{(x - u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(2b + y - u_y t)^2}{4D_y t} \right] \right\} \quad (\text{C.2-9})$$

式中， b 为点源到边界的距离。

当污染源在岸边时，即 $b=0$ 时，浓度计算见式 C.2-10。

$$C(x, y, t) = \frac{2M \exp(-Kt)}{4u_x h \sqrt{D_x D_y t^2}} \exp \left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(y-u_y t)^2}{4D_y t} \right] \quad (\text{C.2-10})$$

⑦ 二维流场连续点源排放的迁移扩散模型

考虑污染源在边界上，排污宽度为 B 的渠道。在这种情况下，由于两个边界的反射，故形成连锁反射。采用影像源法求得的迁移扩散模型见式 C.2-11。

$$C(x, y) = \frac{2M}{uh \sqrt{4\pi D_y x/u}} \cdot \exp\left(-\frac{Kx}{u}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{uy^2}{4D_y x}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{u(2nB-y)^2}{4D_y x}\right] + \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{u(2nB+y)^2}{4D_y x}\right] \right\} \quad (\text{C.2-11})$$

式中， M 为挥发性污染物的瞬时排放量。

C.3 油类污染物

① Fay 扩展模型

Fay 扩展模式是考虑溢油重力、惯性力、黏性力和表面张力在不同扩展阶段所起的作用，本模型忽略排放或泄漏情景对溢油的影响，建立起溢油扩展分阶段模式，公式如下：

$$\text{重力——惯性力阶段： } D = k_1 \cdot (\Delta g \cdot V_0)^{1/4} \cdot t^{1/2} \quad (\text{C.3-1})$$

$$\text{重力——黏性力阶段： } D = k_2 \cdot \left(\frac{\Delta g \cdot V_0^2}{\mu_w^{1/2}} \right)^{1/6} \cdot t^{1/4} \quad (\text{C.3-2})$$

$$\text{黏性力——表面张力阶段： } D = k_3 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_w \cdot \mu_w^{1/2}} \right) \cdot t^{1/4} \quad (\text{C.3-3})$$

式中， V_o 为油粒子体积， ρ_o 、 ρ_w 分别为油和水的密度， μ_w 为水的运动黏性系数， σ 为表面张力， k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 1.14、1.45、2.30。

② 输移扩散模型

采用拉格朗日粒子追踪法的输移扩散方程如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (C.3-4)$$

式中， t 为时间； c 为污染物浓度； (x, y, z) 为粒子的拉格朗日坐标；

(u, v, w) 分别为不同方向流体的速度； K_H 、 K_V 分别为平面和垂向的扩散系数。

③ 吸附模型

河岸对溢油的吸附作用分 3 种情况：完全吸附、完全反射和部分吸附。为了使模型简单明了，只考虑完全吸附和完全反射，设油粒子被吸附的概率为 P ，当 $P=1$ 时，表明该油粒子被河岸完全吸附，当 $P=0$ 时，表明该油粒子被河岸完全反射，计算公式如下：

$$P = \begin{cases} 1: & [R_n]_0^1 < \eta_a \\ 0: & [R_n]_0^1 \geq \eta_a \end{cases} \quad \eta_a = \frac{A_m - A}{A_m} \quad (C.3-5)$$

式中， $[R_n]_0^1$ 是 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数， η_a 为吸附率， A_m 为某区域河岸最大的吸附能力， $A = \sum V_p$ 为某区域河岸已经吸附的溢油。

推荐性引用附录D

暴露评估常用模型

D.1 水-空气-沉积物交换模型 QWASI

QWASI (Quantitative Water Air Sediment Interaction) 模型由加拿大环境模型与化学中心 (Canadian Center for Environmental Modeling and Chemistry, CEMC) 开发, 结合了空气-水以及沉积物-水交换模型合并而成的定量描述水体、空气和沉积物相互作用的模型, 主要进行湖库类水体中污染物的环境暴露归趋模拟。QWASI 模拟的环境区间包括: 充分混合的沉积物区间、充分混合的水体区间以及定义恒定浓度的空气区间。QWASI 模型需要输入的参数包括污染物的理化性质参数和环境参数。其中环境参数是重点, 包括湖泊尺寸、水体进出流量、湖水中颗粒物浓度、空气中气溶胶浓度、表层沉积物固体体积分数、大气沉积参数等。模型计算结果输出包括污染物在湖泊水体各介质中的浓度、停留时间、迁移速率等。

D.2 生物富集模型 FISH

FISH 模型由 CEMC 开发, 是基于逸度的经典生物富集模型, 适用于中性有机物, 不适用于可电离化合物。FISH 模型主要模拟鱼类对污染物的稳态摄取 (呼吸和摄食) 和各种清除过程 (鳃转移、粪便排泄、代谢转化和生长稀释等过程)。FISH 模型输入污染物的理化参数和水中悬浮颗粒参数, 以及鱼体积、脂肪含量、摄食速率、生长速率等生物体参数。模型计算结果输出包括生物浓缩因子 (BCF)、生物累积因子 (BAF) 和生物放大因子 (BMF) 等。

D.3 食物网模型 FOOD WEB

FOOD WEB 模型是 FISH 模型的扩展，模拟水生态系统中污染物的质量平衡。FOOD WEB 模型以捕食者-猎物的矩阵形式模拟水生态环境中的食物网，模型假定浮游生物相的逸度与水相相同，食物链逐级传递到无脊椎动物、小鱼及各营养级别的大鱼。模型计算结果输出为污染物在各营养级别中的浓度，以及各种摄取和清除过程的通量。

D.4 水生态毒理模型 AQUATOX

AQUATOX 模型由美国环保署（USEPA）开发，是一个综合水生态系统评估模型。AQUATOX 模型能将水生态系统中污染物（例如有毒化学物质、营养物质等）的环境迁移转化归趋过程和生态效应结合起来进行表征。AQUATOX 模型可以同时计算模拟评估时段内每天发生的每一个重要化学或生物学过程，模拟生物量、能量及化学物质从生态系统一个组成部分到另一组成部分的转移。该模型既可以作为一个简单的模型用来模拟无生命的多介质环境暴露与归趋，也可以作为十分复杂的食物网模型，模拟生物体之间、生物体与非生命环境之间的相互作用。因此，有可能建立起水质、生物响应、水生态系统服务之间的因果关系链。

模型描述有机毒物的迁移转化过程包括：有机毒物在生物体、悬浮及沉积的腐殖质、悬浮及沉积的无机沉积物和水之间的分配；有机毒物的挥发、水解、光解、离子化以及生物降解作用。模型描述的生态效应部分包括：各种被模拟生物体的急慢性毒性作用；间接生物效应如放牧和捕食行为、生物碎屑增加、来自于死亡生物体的营养再循环、因逐渐增加的分解作用而导致溶解氧的减少、动物的基本食物丧失等。AQUATOX 可单独或同时模拟植物和动物。植物相分为硅藻、绿藻、蓝绿藻及其它藻类（大型植物）；动物相分为食碎屑者、食底

泥者、食浮游物者、食草者、掠食性无脊椎动物、植食鱼、底栖鱼、掠食鱼、游钓鱼等。AQUATOX 允许用户指定多个营养层，可以模拟复杂食物网。该模型已被成功用来模拟溪流、小型河流、池塘、湖泊和水库。AQUATOX 模型早年被广泛用于北美地区水体中有机氯农药、多环芳烃、多氯联苯及酚类化合物的生态效应评价。在我国，这一模型曾被用来评价松花江硝基苯污染事件和大连石油泄漏事件造成的潜在环境影响。近年来，改进的 AQUATOX 模型已经很好的应用于美国的环境损害评估案例，如墨西哥湾漏油事故，模拟确认溢油事故造成的近岸物理生境改变。

推荐性引用附录E

常见水生态系统服务功能损害评估方法

E.1 产品供给

水生态系统产品供给服务价值是指水生态系统通过初级生产、次级生产为人类提供淡水产品、水资源供给等的经济价值。

E.1.1 水产品供给

运用市场价值法对提供淡水产品的供给服务进行价值核算。核算模型如下：

$$V_m = \sum_{i=1}^n Y_i \times P_i \quad (\text{E.1-1})$$

式中， V_m 为生态系统物质产品价值（元/年）； Y_i 为第*i*类生态系统产品产量（根据产品的计量单位确定，如kg/年等）； P_i 为第*i*类生态系统产品的价格（根据产品的计量单位确定，如元/kg等）。

适用范围：由于水环境污染事件、过度捕捞、侵占围垦等生态破坏事件造成鱼虾等水产品的损失。

E.1.2 水资源供给

运用影子价格法对水资源供给价值进行计算。所谓影子价格，是指资源投入的潜在边际效益，它反映了产品的供求状况和资源的稀缺程度，即资源的数量和产品的价格影响着影子价格的大小。资源越丰富，其影子价格越低，反之亦然；对于水资源来说，它所创造的追加效益越高，其影子价格就越高。水资源供给服务计算模型如下：

$$V_w = k \cdot \left(\prod_{t_0}^t P I_t \right) \cdot P_w \cdot Q_w, \quad k = \frac{(1+r)^t - 1}{r (1+r)^t} \quad (\text{E.1-2})$$

式中， V_w 为水资源损失的总价值； P_w 为受影响水资源的影子价格； Q_w 为受影响的水资源量； PI_t 为水产品出厂价格指数，数据来源于中国统计年鉴； t_0 为影子价格的基准年份。 r 为现值系数，根据建设部标准定额研究所关于建设项目经济评价参数的研究成果，我国当前的社会现值系数建议取值为 7%-8%； t 指水资源恢复需要的时间。

适用范围：由于水环境污染事件造成的水资源供给服务的损失，以及突发水环境事件采取的应急措施，如通过释放水库水冲走污染团，也造成水资源损失，包括水量减少及水力发电量减少。

E.1.3 电力供给

水资源的减少导致电力供给的降低。通过调查发电量，包括水力发电等，核算电力供给的减少量，结合当地电力价格，计算得出电力供给减少的价值量。

E.2 支持服务

E.2.1 河床结构破坏与土壤流失

河床结构破坏常见于工程建设与河道采砂等活动，造成河床沉积结构、地形地貌与支撑功能的改变。工程建设与河道采砂等活动改变了河流泥沙与输送能力之间的平衡状态，会造成河床下切，河岸侵蚀，损害河床及河岸带的稳定性，并影响河流的自然水文情势。

河床结构破坏通常还带来土壤流失，因河岸带、湖岸带等区域的植被、沉积结构破坏导致岸边土壤、砂层等环境介质失去固着力后随降雨、水流的冲刷而流失，进而造成河岸生态环境和堤防工程等的破坏。土壤流失造成流失区及周边植被生长环境破坏，也易造成堤防工

程受损，流失的土壤顺流而下淤积河床及下游涉水构筑物，造成河流等水体水文情势的变化。

计算河床结构变化与土壤流失的价值量时，以实际恢复工程法进行核算，即通过实测工程建设、采砂活动及土壤流失等情况造成的损失量或破坏量，进行恢复方案设计。

设计河道、河岸等恢复方案时，应按《水利工程边坡设计规范》（SL386-2007）和《堤防工程设计规范》（GB 50286-2013）等技术规范中关于河道边坡设计的要求开展；评估工程恢复效果时，应充分考虑工程建设、采砂行为、土壤流失发生后对河流水动力条件的改变，计算河道冲淤强度、泥沙恢复饱和系数等，进行河道冲刷、河道演变等分析，如采用三维 ASM 模型研究河床的稳定与变形，采用一维数学模型和动力学模型模拟多级河道泥沙输移等，评估恢复工程实施前后河道、河岸的变化及恢复率。

E.2.2 生物多样性与自然人文遗产维护

对于以生物多样性、自然人文遗产维护为主要服务功能的水域，建议采用恢复费用法计算支持功能损失。当恢复方案不可行时，建议采用支付意愿法或保育成本法计算。

（1）恢复费用法

该方法主要根据将生态环境恢复至基线需要开展的生态环境恢复工程措施的费用进行计算，同时，还应包括生态环境损害开始发生至恢复到基线水平的期间损害。以恢复受损生态环境为目标制定恢复方案或评估恢复费用，保证实施恢复措施后生态环境资源所拥有的资源和所提供的生态服务与污染或破坏事故发生前等量或达到稳定的、可

持续状态，或者好于水生态环境事件发生前的基线状况。通常采用等值分析法计算期间损害，损失和期望恢复效益可用资源或服务单位形式或者货币形式加以表达。生态环境损害会对许多物种、栖息地、生态系统服务功能及人类使用和非使用价值带来不利影响，因此，损失通常是多方面的。此外，损害的时空范围及损坏程度也因损害的度量方式而异。效益是通过补偿性恢复获得的资源或服务效益数量。用量化损失所用的量度对项目的数量、类型和大小进行量化，使预期产生的效益量大致等于损失。为保证损失与效益之间在同一标准下等值，采用以下步骤：量化损害引起的损失；确定每单位效益的预期恢复量，用总损失除以每单位效益恢复量，得出需要的恢复总量。

a) 量化生态环境期间损害

期间损害的计算公式如下：

$$H = \sum_{t=0}^n (R_t \times d_t) \times (1+r)^{(T-t)} \quad (\text{E.2-1})$$

式中， H 是期间损害； t 是评估期内的任意给定年（0~ n 之间）； n 是终止年，是指不再遭受进一步损害（或者通过自然恢复达到，或者通过基本恢复措施达到）的年份； T 是基准年，为开始评估的年份； R_t 是受损害资源或服务的数量； d_t 是损害程度，指资源或服务的受损程度； r 是现值系数。采用现值系数对过去的资源或服务损失进行复利计算和对未来的资源或服务损失进行贴现计算，现值系数一般取值 3%。

b) 确定单位恢复措施产生的恢复期间效益

单位恢复措施产生的生态系统服务期间效益的计算公式如下：

$$E = \sum_{t=1}^n e \times (1+r)^{T-t} \quad (\text{E.2-2})$$

式中, E 为补偿性恢复行动的单位效益, 即补偿性单位资源量或服务量所产生的单位效益, 单位为年; e 为补偿性恢复工程在 t 年的年度单位效益; t_1 为补偿性恢复工程的起始年; T 为计算基准年; r 为贴现系数, 一般取值 0.03。 n 为补偿性恢复工程单位效益的贴现值近似为 0 的年份。

c) 确定补偿性恢复方案的规模

补偿性恢复方案的规模 S 等于需要补偿的期间损害量 H 除以补偿性恢复方案恢复单位资源与服务所产生的效益 E , 计算公式如下:

$$S = \frac{H}{E} \quad (\text{E.2-3})$$

式中, S 为补偿性恢复工程的规模, 通常以恢复的资源量或恢复面积来计量; H 为期间损害量; E 为补偿性恢复工程的单位效益。

(2) 支付意愿法

生物多样性、自然人文遗产作为一种文化服务资源, 其价值主要体现在美学、科研、物种遗传价值等方面, 主要体现为非使用价值, 可以通过人们愿意为其改善或恢复支付的金额来进行评估。采用支付意愿法进行生物多样性经济价值的评估。模型如下:

$$H = \sum_{t=0}^n (\Delta Q_{n,t} \times P_{n,t}) \quad (\text{E.2-4})$$

式中, H 为损失的价值量; t 为评估期内的任意给定年 ($0 \sim n$ 之间), $t=0$ 是起始年, 是损害开始年或损失计算开始年; $t=n$ 是终止年, 终止年是不再遭受进一步损害 (或者通过自然恢复达到, 或者通过主要恢复措施达到) 的年份。 $Q_{n,t}$ 为资源或服务随时间的变化, 此参数可以是资源或服务因损害引起的总变化的定性描述; $P_{n,t}$ 为资源或服务变化的价值, 通过问卷调查设计模拟市场来获取人们赋予环境资源或服务变

化的价值（用货币衡量），可以利用人们对预防环境变化的支付意愿或不希望变化的接受意愿来表达。

（3）保育成本法

水生态系统的生物多样性保育成本主要根据受损水域的鱼类、鸟类、大型底栖动物、高等植物等的物种丰富度，以及珍稀濒危物种的数量及特征来计算。计算模型如下：

$$P_{bio} = G_{bio} \times S_{\#} \times A \quad (\text{E.2-5})$$

$$G_{bio} = 1 + 0.1 \sum_{m=1}^x E_m + 0.1 \sum_{n=1}^y B_n \quad (\text{E.2-6})$$

式中， P_{bio} 为生物多样性价值（元/年）； G_{bio} 为物种保育的实物量； $S_{\#}$ 为单位面积每年物种保护的成本（元/ $\text{hm}^2 \cdot \text{年}$ ），可结合受损物种或栖息地所在区域的当地保育成本来确定； A 为群落面积（ hm^2 ）。 E_m 为区域内物种 m 的濒危物种指数分值； B_n 为区域内物种 n 的特有物种指数分值； x 为计算濒危物种指数物种数量； y 为计算特有物种指数物种数量。

E.2.3 航运支持

航运支持是指通过内陆水路运输的方式运输人和货物，包括客运和货运。可以采用市场价值法计算直接经济损失。航运支持服务价值主要指计算内陆航运的运输费用。内陆航运的航运量和航运价格数据来源包括《中国统计年鉴》《水资源公报》《中国交通年鉴》《中国旅游业年度报告》与相关省市年鉴或统计资料。航运支持服务价值量为客运价值量和货运价值量的总和，计算模型如下：

$$V_t = Q_{客} \times L \times P_{客} + Q_{货} \times L \times P_{货} \quad (\text{E.2-7})$$

式中， V_t 为航运价值量； $Q_{客}$ 为水路运输的年客运人数，人次； L 为客运路线长度，km； $P_{客}$ 为客运价格，元/人次·km； $Q_{货}$ 为水路运输的年货运量，t； $P_{货}$ 为货运价格，元/t·km。

适用范围：适用于因水环境污染、侵占围垦、工程建设等污染破坏事件导致的航运功能的降低。

E.3 调节服务

E.3.1 洪水调蓄

洪水调蓄功能是指自然生态系统其特有的生态结构能够吸纳大量的降水和过境水，蓄积洪峰水量，削减并滞后洪峰，以缓解汛期洪峰造成的威胁和损失的功能。工程建设、地质结构变化和侵占围垦等事件会造成河道改变，湖泊、河岸、水库以及河口湿地等周边的植被也会被破坏，致使洪水调蓄范围缩小，从而导致洪水调蓄能力的减弱。

洪水调蓄量核算的主要思路是依据洪水前后湖泊、水库以及河湖周边沼泽湿地等的水位变化量与相应湿地类型的面积计算。湖泊和水库可直接采用年内水位最大变幅来估算洪水调蓄量：

$$B_1 = S \times \Delta H \quad (\text{E.3-1})$$

式中， B_1 为调蓄量； S 为湖泊或水库面积； ΔH 为洪水前后水位变化量。

沼泽湿地则需要同时考虑沼泽土壤蓄水和地表滞水两部分进行核算：

$$B_2 = S \times \Delta H + O \quad (\text{E.3-2})$$

式中， B_2 为调蓄量； S 为沼泽湿地面积； ΔH 为洪水前后沼泽湿地水位变化量； O 为湿地泥炭土壤蓄水量。

洪水调蓄价值量采用影子工程法进行核算，通过建设水库的成本计算生态系统的洪水调蓄价值。

$$FMV = B \times c \quad (E.3-3)$$

式中， FMV 为洪水调蓄价值； B 为所有湿地（湖泊、水库、沼泽）洪水调蓄能力； c 为建设单位库容的造价。

适用范围：工程建设造成河道改变、地质结构物理变化带来的蓄水容量减少；湖泊、河流岸带或河口湿地植被破坏造成的洪水调蓄降低。

E.3.2 水质净化

水质净化功能是指湖泊、河流、沼泽等水域吸附、降解、转化水体污染物，净化水环境的功能。

水质净化核算需要根据污染情况选取不同的核算方法。当水环境质量满足或优于Ⅲ类水，表明污染物排放量没有超过水环境容量，采用污染物排放量估算水质净化量的实物量。

$$Q_{water\ purification} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (E.3-4)$$

式中， $Q_{water\ purification}$ 为水污染物排放总量（kg）； Q_i 为第*i*类水污染物排放量（kg）；*i*为污染物类别。

当水环境质量劣于III类水，说明污染物排放量超过环境容量，采用水生态系统自净能力估算实物量，将水域按照栅格进行划分。

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \quad (E.3-5)$$

$$HSS_x = \frac{\lambda_x}{\bar{\lambda}_w} \quad (E.3-6)$$

$$\lambda_x = \log(\sum_U Y_u) \quad (E.3-7)$$

式中， ALV_x 为栅格 x 调节的载荷值； pol_x 为栅格 x 的输出系数； HSS_x 为栅格 x 的水文敏感性得分值； λ_x 为栅格 x 的径流指数； $\bar{\lambda}_w$ 为流域平均径流指数； $\sum_U Y_u$ 为径流路径内 x 栅格以上栅格产水量的总和。

水质净化价值量采用替代成本法进行计算，利用工业水污染物治理成本进行核算。

$$V_w = \sum_{i=1}^n c_i \times Q_i \quad (E.3-8)$$

式中， V_w 为生态系统水质净化的价值（元）； c_i 为单位污染物治理成本（元/t）； Q_i 为污染物水质净化实物量（t）。

适用范围：突发水环境污染事件、累积水环境污染事件以及工程建设造成河流、湖泊、水库以及沼泽等水域的水环境质量降低。

E.3.3 气候调节

水生态系统气候调节服务是指通过水面蒸发过程吸收太阳能，降低气温、增加空气湿度，改善人居环境舒适程度的生态功能。气候调节实物量主要依据水面的蒸发量进行估算：

$$E_{we} = E_w \times q \times 10^3 / (3600) + E_w \times y \quad (\text{E.3-9})$$

式中， E_{we} 为生态系统水面蒸发消耗的能量， E_w 为水面蒸发量； q 为挥发潜热； y 为加湿器将单位水转化为蒸汽的耗电量。

气候调节价值量运用替代成本法进行核算，通过人工调节相应温度和湿度所需要的耗电量进行计算：

$$V_{tt} = E_{we} \times P_e \quad (\text{E.3-10})$$

式中， V_{tt} 为生态系统气候调节的价值； E_{we} 为生态系统调节温湿度消耗的总能量； P_e 为当地生活消费电价。

适用范围：侵占围垦和工程建设等生态破坏行为造成水面范围减小，进而导致气候调节能力下降。

E.3.4 土壤保持

土壤保持功能是生态系统（如森林、草地等）通过林冠层、枯落物、根系等各个层次保护土壤、消减降雨侵蚀力，增加土壤抗蚀性，减少土壤流失，保持土壤的功能。当河流和湖泊岸带植被或沼泽湿地被侵占围垦时，土壤受侵蚀度会增加，土壤保持功能降低。

通过设置有植被和无植被两种情景模式，选用两种情境下的植被土壤侵蚀模数进行估算：

$$Q = A \times (X_2 - X_1) \quad (\text{E.3-11})$$

式中， Q 为土壤保持量； A 为湿地土壤面积； X_1 为有湿地植被情景下土壤侵蚀模数； X_2 为无植被情景下土壤侵蚀模数。

土壤保持价值量运用替代成本法进行核算，主要从减少面源污染和泥沙淤积两方面进行考虑，通过清淤工程费用和污染物治理费用进行估算。

$$V_{sr} = V_{sd} + V_{dpd} \quad (\text{E.3-12})$$

$$V_{sd} = \lambda \times (Q_{sr} / \rho) \times c \quad (\text{E.3-13})$$

$$V_{dpd} = \sum_{i=1}^n Q_{sr} \times c_i \times p_i \quad (\text{E.3-14})$$

式中， V_{sr} 为生态系统土壤保持价值（元/年）； V_{sd} 为减少泥沙淤积价值（元/年）； V_{dpd} 为减少面源污染价值（元/年）； Q_{sr} 为土壤保持量（t/年）； c 为单位水库清淤工程费用（元/m³）； ρ 为土壤容重（t/m³）； λ 为泥沙淤积系数； i 为土壤中污染物种类， $i = 1, 2, \dots, n$ ； c_i 为土壤中污染物（如氮、磷）的纯含量（%）； p_i 为单位污染物处理成本（元/t）。

E.4 休闲旅游

对于以休闲娱乐、景观科研为主要服务功能的水域，建议采用旅行费用法计算文化服务损失。旅行费用法是非市场物品价值评估的一种比较成熟的评估技术，主要适用于风景名胜区、休闲娱乐地、国家公园等地的文化服务价值评估。当旅行费用法不可行时，采用支付意愿法计算。

文化旅游服务价值的实物量主要体现在旅游人数，根据旅游部门相关的统计数据获取地区旅游人数，并从中筛选出生态文化旅游人数作为实物量进行核算，即：

$$\text{文化旅游实物量} = \text{生态系统文化旅游人数} \quad (\text{E.4-1})$$

$$\text{旅游文化服务价值} = \text{消费者实际支出费用} + \text{消费者剩余} \quad (\text{E.4-2})$$

旅游文化服务价值的调查计算步骤如下：

1) 对旅游者进行抽样调查，获得游客的客源地、游憩花费金额、游憩花费时间和被调查者的社会经济特征；

2) 定义和划分旅游者的出发地区，以此确定消费者的交通费用和经济水平；

3) 计算每一区域内到研究区旅游的人次（旅游率）；

$$Q_i = \frac{V_i}{P_i} \quad (\text{E.4-3})$$

式中， Q_i 为旅游率； V_i 为根据抽样调查的结果推算出的 i 区域中到评价地点的总旅游人数； P_i 为 i 区域的人口总数。

4) 根据对旅游者调查的样本资料，用分析出的数据，对不同区域的旅游率和旅行费用以及各种社会经济变量进行回归，建立需求模型，即旅行费用对旅游率的影响。

$$\text{消费者实际支出费用} = \text{交通费用} + \text{景区门票费} + \text{食宿费} + \text{购买旅游商品费用} + \text{娱乐休闲费用} + \text{时间成本}$$

$$\text{时间成本} = \text{旅行时间} * \text{客源地平均工资}$$

5) 计算旅游文化服务的剩余价值。

$$V_T = \int_{\text{实际旅费}}^{Pm} f(x) dx \quad (\text{E.4-4})$$

式中， V_T 为消费者旅游服务剩余价值； Pm 为追加旅费最大值； $f(x)$ 为旅游费用与旅游率的函数关系式。

推荐性引用附录F

常用地表水与沉积物环境及水生态系统服务功能修复和恢复技术适用条件与技术性能

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
曝气增氧技术	向处于缺氧（或厌氧）状态的河道进行人工充氧，增强河道的自净能力，净化水质、改善或恢复河道的生态环境。	有机污染物	在污水截流管道和污水处理厂建成之前，为解决河道水体的有机污染问题而进行人工充氧；在已治理的河道中设立人工曝气装置作为应对突发性河道污染的应急措施。	设备简单、机动灵活、安全可靠、见效快、操作便利、适应性广，但河流曝气增氧-复氧成本较大。	该技术在国外应用已经非常成熟。国内除了在北京、上海等地的小河道治理中使用过外，尚未在大规模河道综合治理中应用。	非常适合于城市景观河道和微污染源水的治理	对水生态不产生二次污染和破坏。
生态浮床技术	将植物种植于浮于水面的床体上，利用植物根系直接吸收和植物根系附着微生物的降解作用有效进行水体修复。	总磷、氨氮、有机物等	适用于富营养化水体的原位修复，受植物的季节性影响严重。	投资成本低，运营成本高。	技术相对成熟，国内有一定的应用案例。	技术可靠	部分植物有造成生物入侵的风险。

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
引水冲污/换水 稀释技术	通过加强沉积物-水体界面物质交换, 缩短污染物滞留时间, 从而降低污染物浓度指标, 死水区、非主流区重污染河水得到置换, 改善河道水质。	无机和有机 污染物	适用于水资源丰富的地区。通常作为应急措施或者辅助方法。	需要耗费大量优质水资源。引水工程量较大, 费用较高。	在国内外湖泊富营养化治理中有所应用, 对于污染严重且流动缓慢的河流也可考虑采用。	技术可靠	没有从根本上去除污染物质, 增加了河道的水体, 对下游会造成一定的冲击, 污染物质随着水流进入下游, 将影响下游的水质和负荷。
底泥疏浚技术	去除底泥所含的污染物, 消除污染水体的内源, 减少底泥污染物向水体的稀释。	氮、磷、重 金属、有毒 有害有机物	实施的基础和前提条件是湖泊和河流外源必须得到有效控制和治理, 否则无法保证疏浚效果的持续, 也就无法达到改善水质与水生态的数据目的; 疏浚的重要原则之一是局部区域重点疏浚, 优先在底泥污染重、释放量大的河段与湖区开展底泥疏浚; 需与生态重建有机结合才能达到良好的效果。	工程量大、成本 高。	成熟度高, 在国内外已经得到广泛的工程应用。	技术可靠	疏浚过深将破坏原有生态系统; 对于清除的底泥要进行后续处理, 处理不当易引起二次污染。
化学絮凝技术	通过投加化学药剂去除水中污染物以达到改善水质的污水处理技术。	磷、重金属 等	适用于突发水环境事件临时应急措施。	工程量大、成本 高。	成熟度较高, 国内多次应用在突发环境事件应急处置中, 如镉污染、锑污染等。	技术可靠、快速 高效	处理效果易受水体环境变化的影响, 且必须顾及化学药剂对水生生物的毒性及对生态系统的二次污染, 应用具有很大的局限性。

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
生物膜法技术	结合河道污染特点及土著微生物类型和生长特点，培养适宜的条件使微生物固定生长或附着生长在固体填料载体的表面，生成胶质相连的生物膜。通过水的流动和空气的搅动，生物膜表面不断和水接触，污水中的有机污染物和溶解氧为生物膜所吸收从而使生物膜上的微生物生长壮大。	溶解性的和胶体状的有机污染物	微生物群体通过摄取有机物，在一定范围内繁殖并培养出菌群，能可持续去除水中污染物。生物膜法的适应能力很强，能根据水质、水文、水量的变化发生变化，消化能力与处理能力较好。	投资运营费用较大，实施时需要大量的投资，及一定的管理技术和经费。	用于河流净化的生物膜技术在国外研究较多，尤其是日本，已在工程实践中运用多种生物膜技术对污染严重的小河流进行净化。	能有效去除水体中的氨氮和有机物，可以大大改善水质。	该技术未改变地表水体原有的生态系统，不会造成二次污染和破坏。
人工湿地技术	湿地修建在河道周边，利用地势高低或机械动力将部分河水引入到生长有芦苇、香蒲等水生植物的湿地上，污水在沿一定方向流动过程中，经过水生植物和土壤的作用净化后回到原水体。	氮、磷、重金属等污染物	污水处理系统的组合具有多样性和针对性，减少或减缓外界因素对处理效果的影响；可以和城市景观建设紧密结合，起到美化环境的作用。受气候条件限制较大；设计、运行参数不精确；占地面积较大，容易产生淤积、饱和现象；对恶劣气候条件防御能力弱；净化能力受作物生长成熟程度的影响大。	投资费用低，建设、运行成本低，处理过程能耗低。	该技术已经非常成熟，在国内外有广泛的工程应用。	污水处理效果稳定、可靠。	位置选择不当或处理能力不满足实际需求时，会污染周围土壤和地下水。
微生物直投法净化技术	利用微生物唤醒或激活河道、污水中原本存在的可以净化水体但被抑制不能发挥功效的微生物，从而降解水体中的污染物。	氮、磷、重金属等污染物	当河流污染严重而又缺乏有效微生物作用时，投加微生物能有效促进有机污染物降解。适合湖库水体在藻类大量爆发前使用，可弥补微生物制剂见效时间较长的缺点。	工程量小，投资成本高。	技术相对成熟，国内外有一定应用。	受限于微生物适应性和水体特点，修复效果不一。	所投加的微生物若含病原菌等有害微生物，会破坏水体原生生态系统。

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
砾间接触氧化技术	通过在河流中放置一定量的砾石做充填层，增加河流断面上微生物的附着膜层数，水中污染物在砾间流动过程中与砾石上附着的生物膜接触沉淀。		适用于污染物浓度较低的河流，当水体 BOD 高于 30mg/L 时，应增加曝气系统。	投资和运行成本低。	该技术在国外应用已经非常成熟，在日本和韩国有成熟的工程应用案例。	技术可靠	对水生态不产生二次污染和破坏。
河道稳定塘技术	利用植被的天然净化能力处理污水，实现水体净化。		可利用河边的洼地构建稳定塘，对于中小河流（不通航、不泄洪）可直接在河道上筑坝拦水构建河道滞留塘。江南地区可利用氧化塘的水面种植多种水生植物，养殖鱼、贝、虾等，建立复杂的多级稳定塘系统。	投资较少。	成熟度高，国内外已经得到广泛应用。	具有统一和调和微生物水生植物的功能，修复效果好。	对水生态不产生二次污染和破坏。
河床生态构建技术	通过埋石法、抛石法、固床工法、粗柴沉床法或巨石固定法等方式将石头或柴等材料置于河床上，营造水生生物和微生物生长的河床，改善水体生态系统。		埋石法一般用于水流湍急且河床基础坚固的地区。	投资费用低，运行过程能耗低	成熟度高，国内外已得到工程应用。	能有效改善水体生物和微生物生长环境。	重构水生态系统，对水生态不产生二次污染和破坏。

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
增殖放流技术	增加水生生物数量。		地表水体中鱼虾类等水生生物数量因受到损害而降低，可采用增殖放流的措施进行恢复。具体方法参考 SC/T 9401。	对水域条件、苗种来源、亲体来源、苗种培育等有严格要求，技术要求较高，成本较大。	该技术在国内应用成熟，具有相关技术规程。	适合鱼虾类等水生生物数量严重受损，且适合进行恢复的情况。	对水生态不产生二次污染和破坏。
河道整治	按照河道演变规律，恢复河道稳定结构，改善河道边界条件、水流流态和生态环境的治理活动。		因非法采砂等生态破坏行为造成河岸、河床、河滩地等结构等受损，威胁水文情势安全及水生生物栖息与生存环境，具体方法参考 GB 50707。	操作较简单，成本较高。	该技术在国内应用成熟，具有相关技术规程。	适合河道结构遭受破坏，需要通过工程措施，如回填等恢复到河道稳定结构状态。	有产生二次污染和破坏的风险。
物种孵化技术	采用人工孵化计算，对受损水生生物物种进行恢复，增加物种数量。		适合于受损物种的数量恢复，孵化技术措施包括饲养场选择、布局、笼舍、孵化室、育苗室、饲养等。	需要一定的场地空间，并进行笼舍建设等，成本较高。技术水平及环境条件要求较高。	该技术在国内应用成熟，具有相关技术规程。	非常适合动物物种数量及种群的恢复。	无产生二次污染和破坏的风险。

恢复技术	技术功能	目标污染物	适用性	成本	成熟度	可靠性	二次污染和破坏
洄游通道	通过恢复河道自然连通，增设鱼道等措施构建洄游性鱼类洄游通道，恢复其繁殖栖息环境和条件。		适合于因大坝等水利工程建设阻挡鱼类洄游通道，导致洄游性鱼类减少或消失的情况。通过恢复或构建鱼类洄游通道，保证其自然洄游路线畅通，促进其自然繁殖、栖息。	需通过河道整治、在水利工程处补建洄游通道、保证水体质量等措施，重建洄游通道，成本较高。	综合了多方面的技术措施，成本较高。	适合鱼类洄游通道恢复。	无产生二次污染和破坏的风险。
营建人工繁殖岛（栖息地建设）	针对部分水生生物、集群营巢的鸟类（如鸥、燕鸥和一些水禽）、水生哺乳动物等可以通过岸滩修复、修建岛屿、渔业资源增殖放流等来帮助创造营巢地、栖息地，改善水域生态状况，创造适宜动物栖息的空间。		适用于水生生物、水禽栖息地受到破坏导致物种和种群数量减少的情况。通过营建人工繁殖岛，促进物种种群数量增长与恢复。	需要一定的场地空间，并建立适宜的栖息环境，且需要适当的监测维护措施，成本较高。	针对不同物种栖息地建设，国内外均有一定数量的成功案例。但针对不同物种栖息地建设的成熟度及发展水平不一。部分鸟类物种栖息地建设发展较为成熟，而针对地表水体的水生生物栖息地建设缺少成熟的技术规范。	适合水禽和哺乳动物等物种数量和种群的恢复。	无产生二次污染和破坏的风险。