

ICS 编号

CCS 编号

团体标准

T/CHES XXX—20XX

数字孪生湖库水质管理系统设计 技术导则

The Technical Guidelines for the Design of Digital Twin Lake and
Reservoir Water Quality Management Systems

（报批稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	1
5 监测感知	1
5.1 一般规定	1
5.2 水文监测	2
5.3 水质监测	2
6 系统平台	3
6.1 一般规定	3
6.2 数据库	3
6.2.1 一般规定	3
6.2.2 地理空间数据	3
6.2.3 基础数据	3
6.2.4 监测数据	4
6.2.5 业务管理数据	4
6.2.6 跨行业共享数据	4
6.3 模型库	5
6.3.1 一般规定	5
6.3.2 水环境评价模型	5
6.3.3 水环境机理分析模型	5
6.3.4 数理统计模型	5
6.3.5 智能识别模型	5
6.3.6 可视化模型	6
6.3.7 模拟仿真引擎	6
6.4 知识库	6
6.4.1 一般规定	6
6.4.2 预警规则库	6
6.4.3 历史场景库	7
6.4.4 预案管理库	7
7 业务应用	7
7.1 一般规定	7
7.2 预报	7
7.3 预警	8
7.4 预演	8
7.5 预案	8
附录 A（资料性）湖库水环境专业模型	9

前 言

根据中国水利学会团体标准制修订计划安排，本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件共分为 7 章和 1 个附录，主要内容包括数字孪生湖库水质管理系统监测感知体系、系统平台、业务应用等设计的技术要求。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条 16 号，邮编 100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：长江水利委员会长江科学院。

本文件参编单位：南水北调中线水源有限责任公司、水利部太湖流域管理局。

本文件主要起草人：林莉、马水山、罗平安、蒋蓉、李全宏、唐文坚、靖争、曹俊启、李晓萌、赵科锋、唐见、翟文亮、金海洋、曹慧群、黄华伟、郑学东、李勇涛、徐兆安等。

引 言

湖泊和水库是我国饮用水水源地的的重要组成部分，在我国的供水系统中占有重要地位。据统计，全国 1093 个市县级集中式饮用水源地中，湖库型水源地数量占比最高，达 40.6%。然而，湖库型水源地流速缓慢，污染物容易累积，富营养化问题相对突出，亟需进一步加强湖库水源地水质安全预警体系和监管能力，以有效应对突发污染事件的发生。

数字孪生湖库水质管理系统是数字孪生湖库的重要组成部分，是在数字孪生水利建设基本框架的基础上，根据湖库水质管理实际应用需求，对监测感知、数据底板、模型库、知识库、业务应用等具体内容进行的扩展补充。

本标准参照水利部印发的数字孪生水利相关建设技术大纲、技术导则、共建共享管理办法和水利业务“四预”基本技术要求，结合实践工作经验提出，旨在规范数字孪生湖库水质管理系统建设内容与流程，指导数字孪生技术在湖库水质管理领域的应用，为水利行业的数字孪生标准化建设提供支持。

数字孪生湖库水质管理系统设计技术导则

1 范围

本文件规定了数字孪生湖库水质管理系统的体系架构和监测感知、系统平台、业务应用功能等设计的技术要求。

本文件适用于湖库水体的数字孪生水质管理系统的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3838 地表水环境质量标准

GB/T 50138 水位观测标准

GB 50179 河流流量测验规范

SL 219 水环境监测规范

SL/T 809 水利对象基础数据库表结构及标识符

HJ 2.3 环境影响评价导则地面水环境

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

HJ 589 突发环境事件应急监测技术规范

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 总体要求

本文件仅针对数字孪生湖库水质管理系统在监测感知体系、系统平台和业务应用等方面的专门性要求进行规定，其他通用性内容的建设要求可参考数字孪生水利建设相关标准执行，本标准中不再重复说明。

5 监测感知

5.1 一般规定

5.1.1 监测感知要素应包括湖库水文监测、水质监测等类别。水文监测提供水位、流量等关键数据，是水质监测的重要配套手段，可为水质模拟提供数据支撑。水文监测宜与水质监测同步进行，确保数据的时效性与一致性。

5.1.2 应结合湖库水质管理需求，在传感器采集、人工调查等传统监测感知方式的基础上，强化卫星遥感、无人机（船）、高清视频、移动实验室等新型监测感知手段，满足数字孪生

系统对水质监测实时性、准确性和全面性的需求。

5.1.3 应接入湖库管理范围内已建监测站点数据。若现有站点监测指标、频次或精度无法满足水质管理需求的，可新建站点。新建站点应遵循数字孪生水利总体框架，纳入现有监测站网统一管理。新建水文站点要求应按照 5.2 执行，新建水质站点要求应按照 5.3 执行。

5.1.4 监测设施宜选用具备自动测报、多种通信、断电存储、故障报警、低功耗等功能的产品，应支持远程运维和 IPv6，确保监测数据传输的实时性、稳定性与安全性。

5.2 水文监测

5.2.1 水文监测断面应包括湖库入流、出流及湖库重要控制断面。新建水文或水位自动监测站断面布设应满足下列要求：

- a) 入流断面应布设在流量大于总入湖库流量 20%以上的河流汇入口，或流量大于总入湖库流量 10%以上且水质低于湖库水质管理标准的河流汇入口。
- b) 出流断面应布设在水库坝前流态平稳区域或湖泊主要出口前流态平稳区域。
- c) 湖库区控制断面应布设在能够反映水域水位变化的区域。若不同区域水位差大于 15cm 可增设控制断面。

5.2.2 入流断面监测指标应包含流量；出流断面监测指标应包含流量或水位；湖库区监测指标应包含水位。可根据水质模拟指标（如重金属、总磷）及模型选择补充监测泥沙指标。

5.2.3 应加强排污口等污染源入流断面水文监测频次。污染源连续排放时，入流流量监测频次宜不低于 10 分钟一次；间歇排放时，入流流量监测时间间隔不宜超过污水累计排放小时数的 6 倍。

5.2.4 水位监测应符合 GB/T 50138 要求，流量监测应符合 GB 50179 要求。

5.2.5 应强化雷达测流、水尺图像识别、流量 AI 视觉分析等新技术应用，提升监测精度和应急响应能力。

5.3 水质监测

5.3.1 水质监测断面应包括湖库入流区、出流区、中心区及其他水质敏感水域。新建水质自动监测站断面布设原则，应在遵循 SL 219 和 HJ/T 91 等相关规定的基础上，还应满足下列要求：

- a) 应结合监测区域水文水动力及自然地理气候条件，选择具有代表性的水域布设水质监测站点。站点布设宜尽可能与水文监测点位布设相一致，满足获得连续性数据的需要。
- b) 在水质超标频发且环境条件具有代表性的位置布设常规监测站点，用于开展常规监测和预警监测，便于长期、连续的监测。
- c) 当面临突发水污染事件时，若常规水质监测站点难以满足应急需求，应根据现场情况及时布设应急监测点位。应急监测方法及断面布设要求，可参照 HJ 589 相关规定执行。

5.3.2 湖库水质监测指标宜按照“9+X”方式进行确定，其中“9”为基本指标，包括水温、pH、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮；“X”为特征指标，可结合湖库水质超标情况及水质安全保障工作需求进行动态调整。

5.3.3 为满足数字孪生系统对实时监测和动态模拟的需求，水质监测应采用自动化监测设备。其中水温、pH、溶解氧、电导率、浊度 5 项指标监测频次不宜低于 1 次/小时；高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮 4 项指标监测频次不宜低于 6 次/日。应急监测频次应根据污染源种类及事件严重程度动态调整，确保数据的及时性和准确性。

5.3.4 应根据水质实际管理需求，补充特征指标（如重金属、油品等）自动监测设备。针对

由于技术限制无法开展自动化监测的水质指标，应进一步优化人工采样方法，提高监测频次和精度。

5.3.5 宜加强卫星遥感、无人机（船）、视频监控等新技术的应用，提供水体颜色识别、水温识别、藻类水华识别等多维度监测手段，提升水质监测覆盖能力、丰富监测要素。

5.3.6 宜根据突发水污染应急监测需要，配备无人机（船）、移动实验室等技术设备，支持无线或移动网络数据传输，确保采样数据迅速上传并与监测系统实时共享。

6 系统平台

6.1 一般规定

6.1.1 系统平台建设应以支撑具有“预报、预警、预演、预案”业务功能的湖库水质管理系统为核心目标，在湖库数字孪生平台的基础上，根据水质实际管理需求进行补充扩展。

6.1.2 系统平台主要由数据库、模型库、知识库等构成，且应符合以下要求：

- a) 数据库应包括基础数据、监测数据、业务管理数据、外部共享数据、地理空间数据（含三维可视化场景）等。
- b) 模型库应包括水环境评价模型、水环境机理模型、数理统计模型、智能识别模型、可视化模型等，满足多场景模拟与计算的需求。
- c) 知识库应包括水质预警规则库、水质历史场景库、水质预案管理库等，用于支持水质智能化管理决策。

6.1.3 系统平台应与湖库数字孪生平台的框架和技术标准保持一致，确保数据共享、模型集成与知识管理的协同运作，并应按照统一的接口标准实现各部分的互通与兼容。

6.2 数据库

6.2.1 一般规定

6.2.1.1 应优先使用数字孪生湖库系统已建的数据资源。新建数据资源应纳入数字孪生湖库数据库进行统一管理，确保数据一致性与匹配性。

6.2.1.2 宜采用图像识别、自然语言处理等先进技术，提高数据的采集、处理、分析效率。

6.2.1.3 可依据湖库水质管理的实际业务需求，优化数据库的数据资源架构满足高并发场景需求。

6.2.2 地理空间数据

6.2.2.1 地理空间数据应包括湖库数字高程模型（DEM）、水下地形、三维可视化场景数据等。

6.2.2.2 地理空间数据精度、更新频次、数据格式等可参考数字孪生流域数据底板地理空间数据相关规范要求，并根据水质管理实际业务需求动态更新。

6.2.3 基础数据

6.2.3.1 应收集整编湖库水体及支流、水利工程、监测站点、污染源、其他管理对象等水利对象的主要属性数据和空间数据。

6.2.3.2 基础数据宜来源于第一次全国水利普查成果、水利一张图以及跨行业共享成果；应优先引用数字孪生湖库系统已建的相关数据资源，避免重复建设。

6.2.3.3 基础数据特征属性可参考 SL/T 809 中各类水利对象基础信息，应对所有对象进行

统一编码，且应根据水质管理业务需要实时或定期更新。

6.2.4 监测数据

6.2.4.1 应根据需求通过包括湖库水位监测、流量监测、水质监测、视频监控、无人机（船）巡查、卫星遥感数据等在内的各类监测感知手段获取湖库水质状态属性。

6.2.4.2 水位监测、流量监测、水质监测数据应使用 CSV、XML、JSON 等标准格式进行存储和传输，数据采集与更新要求参见第 5 章。

6.2.4.3 视频监控数据应使用常见的视频格式（如 MP4、AVI 等），并附带监控地点、时间戳等元数据。

6.2.4.4 无人机（船）监测数据的精度应不低于厘米级，且应使用 GeoTIFF、JPEG 等高分辨率图像格式，附带位置、时间等元数据。

6.2.4.5 卫星遥感数据的精度应不低于 10m，且应使用 HDF5、GeoTIFF 等格式；数据应无条带或缺失现象，几何校正的精度控制在 1 个像元之内，确保适用于水质遥感解译。

6.2.4.6 应采用多源数据对比分析方法，确保监测数据的一致性和准确性。

6.2.5 业务管理数据

6.2.5.1 业务管理数据是指水质安全保障业务管理中产生的有关数据，宜包括水污染事故与应急管理、监测/检测管理、水库闸坝调度指令等数据。业务管理数据建设内容可参考表 1 的规定。

表 1 业务管理数据建设内容

数据类型	数据内容
预报	预报断面水质预报方案，各类模型参数及过程信息等
预警	水质预警数据，包括预警记录、预警发布信息等
预演	典型水污染事件水质过程数据；不同调度方案调度参数、调度目标信息，方案评价分析结果等
预案	水质监测/检测管理信息；突发水污染事故应急调度方案；不同预案及调度措施信息、调度令、应急响应信息等

6.2.5.2 业务管理数据应根据水质管理实际业务需求动态更新。

6.2.6 跨行业共享数据

6.2.6.1 宜汇集气象、生态环境、交通运输、住房和城乡建设等各行业部门数据。

6.2.6.2 跨行业共享数据建设内容可参考表 2 的规定。其中，气象数据、社会经济数据应优先引用数字孪生湖库系统已建数据资源，其余数据应根据水质管理的实际需求动态更新。

表 2 跨行业共享数据建设内容

数据类型	数据内容
气象数据	降雨、气温、风向、风力等气象要素的实况和预报数据
生态环境数据	污染负荷数据、环境水体监测数据（含自动监测数据）、环境状况统计公报等
交通运输数据	跨越水体或与水体并行的县级及以上公路、桥梁的基本情况；航道与运输危险化学品的船舶的基本情况；运输油品、化学品种类和规模等
住房和城乡建设数据	污水处理厂数据等
社会经济数据	省、市、县最新的统计年鉴数据等

6.3 模型库

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 应在共享水利部、流域管理机构、省级水行政主管部门等通用模型的基础上，以保障湖库水质安全为主要目标，按需构建水环境评价模型、水环境专业模型（机理分析模型、数理统计模型、混合模型）、智能识别模型、可视化模型。

6.3.1.2 应通过模型平台对各类模型进行统一管理，模型输入输出数据宜采用 NetCDF、JSON、XML 等格式。水环境专业模型的输入输出标准化改造要求可参考数字孪生平台水利专业模型输入输出数据结构规范等有关文件执行。

6.3.1.3 应对模型进行标准化封装，模型封装要求可参考数字孪生平台水利专业模型封装技术要求等有关文件执行。

6.3.2 水环境评价模型

水环境评价模型可分为水质评价模型、综合营养状态指数评价模型、水环境容量分析模型等，其计算方法、建模流程及选择依据可参见附录 A.1。

6.3.3 水环境机理分析模型

6.3.3.1 常规水质模型主要用于支持湖库及入湖库河流水体的日常水质管理，适用于模拟常规水质指标（如氮、磷等）的时空变化过程。模型通过接入湖库入流、出流及湖库重要控制断面水文、水质监测数据，提供水质趋势分析和决策支持。

常规水质模型根据应用场景可分为零维、一维、二维（包括平面二维及立面二维）以及三维水质模型。

常规水质模型的建模流程及选择依据可参见附录 A.2.1。模型计算结果的水质模拟误差应控制在 30% 以内。

6.3.3.2 突发水污染模型用于应急情况下快速模拟突发性污染事故（如溢油、危化品泄漏等）中污染团的迁移和扩散过程，为污染事件应急响应和风险评估提供支持。

突发水污染模型一般通过输入以下参数进行分析：

- a) 污染物特性：泄漏总量、泄漏速率、泄漏时长以及污染物的理化性质等；
- b) 环境条件：水文参数（如流速、水位等）、气象参数（如风速、风向等）。

突发水污染模型可实现以下功能：

- a) 预测污染团在水体中的时空分布特征，包括浓度变化趋势、扩散范围和持续时间；
- b) 评估污染物对饮用水水源地等敏感目标的潜在风险；
- c) 支持污染事件应急调度与处置模拟。

突发水污染模型的建模流程可参见附录 A.2.2。模型计算结果的水质模拟误差应控制在 30% 以内。

6.3.4 数理统计模型

6.3.4.1 宜基于数理统计和数据挖掘等技术，构建数据驱动的水质预测、水质监测数据异常识别、水质安全状态评估、污染溯源分析等数理统计模型。

6.3.4.2 数理统计模型的建模流程及选择依据可参见附录 A.3。水质预报误差应控制在 30% 以内。

6.3.5 智能识别模型

6.3.5.1 宜采用计算机视觉和机器学习技术，结合遥感、视频、图像等监测监控数据，构建用于涉水要素识别、行为分析或事件检测的智能识别模型，用于湖库水质参数、漂浮物、水体颜色异常等识别分析。

6.3.5.2 水质智能识别模型主要包括视频图像智能识别模型和水质遥感反演模型，其建模流程及选择依据可参见附录 A.4。

6.3.5.3 智能识别模型的技术性能要求如下：

- a) 图像识别模型的识别准确率应达到 85%以上；
- b) 视频事件检测模型的识别准确率应达到 75%以上；
- c) 水质遥感反演模型的准确率和召回率均应达到 80%以上。

6.3.6 可视化模型

6.3.6.1 宜在数字孪生系统的通用可视化模型基础上（包括自然背景及流场动态可视化场景），采用立体渲染技术，通过网格内插、切片编码、数据解析与转换，对水质浓度场进行动态可视化展示。模型应支持多维度、多尺度的水质信息交互式展示，提升数据的直观性和实用性。

6.3.6.2 水质可视化模型包括基于图形学的水质可视化模型和基于图像的水质可视化模型，其建模流程及选择依据可参见附录 A.5。

6.3.7 模拟仿真引擎

6.3.7.1 模拟仿真引擎应包括模型管理、场景配置、模拟仿真等功能。

6.3.7.2 模型管理宜采用组件化、工作流及容器编排等技术，提供以下功能：

- a) 模型及相关工具集的注册、发布与版本管理；
- b) 模型组装编排与计算方案构建；
- c) 优化计算、结果输出与模型评估；
- d) 状态监控与微服务化计算分析服务的支持。

6.3.7.3 场景配置应基于模型计算需求和渲染展示目标，对数据资源与模型资源进行合理抽取与组织，形成用于模拟仿真的特定场景。

6.3.7.4 模拟仿真应结合二三维可视化平台，提供以下功能：

- a) 模拟仿真结果的可视化表达；
- b) 仿真推演与动态渲染；
- c) 模拟仿真场景与模型计算结果的融合展示。

6.4 知识库

6.4.1 一般规定

6.4.1.1 水质知识库是对象关联关系、业务规则、历史场景、专家经验和逻辑规则等各类知识的集合，用于辅助水质业务有效管理和精准决策。

6.4.1.2 宜针对湖库水质管理需求，构建预警规则库、历史场景库、预案管理库。应通过知识平台对各类知识进行集中化、标准化统一管理和应用。

6.4.2 预警规则库

6.4.2.1 预警规则库应包括水质预警等级分类及预警等级划分标准，用以支撑水质超标风险识别及预警信息推送。

6.4.2.2 水质预警等级分为以下三类：

- a) 一级预警（红色）：最高预警等级；
- b) 二级预警（橙色）：次高预警等级；
- c) 三级预警（黄色）：最低预警等级。

6.4.2.3 预警等级划分应基于 GB 3838 的水质类别标准，结合目标水体水质现状、保护需求及水质目标，综合确定湖库水质预警等级分级阈值。

6.4.3 历史场景库

6.4.3.1 历史场景库用以支撑相似场景的快速查找匹配，支撑预演预案模拟对比。

6.4.3.2 历史场景库应包括突发污染事故等历史场景的场景特征、处置过程及效果、经验等内容，且应符合以下要求：

- a) 场景特征应包括污染事件的类型、发生时间、影响区域、污染源、污染物种类、污染物排放量及浓度等。
- b) 处置过程及效果应包括应急响应措施、污染源控制、污染物清除和水质恢复措施，以及这些措施的实施效果评估记录。

6.4.4 预案管理库

6.4.4.1 宜根据管理需要，针对污染事件设定应急监测方案，包括设置监测频次、监测点位和监测指标等。

6.4.4.2 宜根据管理需要，针对污染事件设定应急处置预案，包括启动增氧设备、投加水质净化剂、实施临时截污、启用备用水源，以及紧急通知取水户停止取水，启动污染物质隔离和污染控制工程等。

6.4.4.3 宜结合现有的水工程调度规程，针对不同污染物质特性制定湖库应急调度策略，包括排水量（或水库下泄水量）和排水时间参数等，以优化污染物的稀释和去除效率。

7 业务应用

7.1 一般规定

7.1.1 业务应用应涵盖水质预报、预警、预演、预案“四预”业务，应具备未来水质预报，水质信息预警，水质态势预演以及风险应对预案等功能。

7.1.2 “四预”业务可按以下流程执行：

- a) 基于水质实时监测数据，进行水质超标告警，并触发水质预报；
- b) 基于水质预报结果，进行水质超标预警；
- c) 当警情发生时，启动预演模拟，预测污染物扩散过程及影响范围；
- d) 根据预演结果，优化应急预案，并推荐最优处置方案。

7.1.3 可根据用户实际业务需求，优化调整“四预”业务功能内容及业务流程。

7.2 预报

7.2.1 水质预报对象一般是湖库控制断面或湖库重点区域的水质要素，包括水质指标浓度、水质峰值时间、水质演变过程等。

7.2.2 应充分利用短中长期水文预报结果，结合水质监测数据、污染源分布、气象信息等多重因素构建水质预报方案，满足不同预见期水质预报要求。

7.2.3 应从湖库水质变化规律出发，选择适用性强的模型方法，实现水质在线自动预报，并满足精度要求。

7.2.4 水质预报业务模块应具有以下基本功能：

- a) 多源数据实时交互：实时接收和在线处理水质监测、污染源监测、气象数据、遥感监测等多源信息，实现数据融合和动态更新。
- b) 多模型的预报计算与校正：集成机理模型与数理统计模型，支持水质短期、中期及长期变化趋势的自动预测与校正，并与水质实时监测数据进行在线比对，动态评估预报精度。

-
- c) 预报结果输出与共享：支持按照相关规范要求自动生成水质预报结果，通过在线平台实时推送并共享给相关部门。

7.3 预警

7.3.1 水质预警对象一般是湖库控制断面或湖库重点区域的水质超标要素，包括水质超标指标、水质超标时间、水质超标范围及其影响风险等。

7.3.2 应结合实时监测及预报成果，评估水质要素超标风险，并按照预警管理办法及时推送预警信息。

7.3.3 水质预警业务模块应具有以下基本功能：

- a) 监测告警：基于实时监测数据，结合告警规则和阈值，提供监测站点超标个数、超标占比、超标指标、水质级别、水质级别占比、告警等级、告警断面位置等分析展示功能。
- b) 预测预警：基于水质预报结果，结合预警规则和阈值，提供水质超标面积、超标占比、超标指标、预警等级、预警区域位置等分析展示功能。
- c) 预警信息推送：按照预定的预警等级，确定预警信息内容，根据业务管理需求和有关规定推送预警信息；预警信息应包括超标水质指标、受影响区域、预计影响时间、可能的环境与公共健康风险、建议采取的应急措施等。

7.4 预演

7.4.1 水质预演是通过数字孪生平台构建水污染事故预演场景，分析污染物扩散过程和水质变化趋势，为预案决策提供支持。

7.4.2 水质预演业务模块应具有以下基本功能：

- a) 预演方案设置：支持自定义设置污染事件的发生地点、时间、排放方式、污染物类型、污染处置措施等，自动调用水文水质关联数据，通过地图交互操作快速构建预演场景；典型预演场景一般包括历史水污染场景、日常水质管理场景、突发水污染场景等。
- b) 模拟推演仿真：支持在线调用水环境机理模型，结合三维可视化全景仿真和流场、浓度场渲染技术，正向预演污染物扩散过程、超标时间和影响范围，逆向推演水质达标控制条件，生成相应处置预案。
- c) 预演结果分析：支持在孪生平台在线展示不同场景水质变化态势，提供污染物扩散方向、速度、影响范围及程度的自动化分析，实时评估污染影响的程度，自动识别受污染的关键区域。

7.5 预案

7.5.1 水质预案业务应包括应急监测管理、应急处置管理等模块。

7.5.2 水质预案业务模块应具有以下基本功能：

- a) 预案生成：基于预演或预警结果，通过智能算法自动生成水质预案。预案内容应包括应急监测方案（如应急监测时间、监测指标、监测频次等）、应急处置方案（如污染拦截、污染削减、水工程联合调度方案等）。
- b) 预案对比：提供多种预案的处置效果对比，提出应急决策方案优化建议。
- c) 预案管理：分类存储和管理生成的预案，支持查看、编辑、审核和批准等权限设置。
- d) 预案执行：管理预案的批准、下发及执行流程，确保批准后的预案及时分发至相关部门和人员。

附 录 A
(资料性)
湖库水环境专业模型

A.1 水环境评价模型

A.1.1 水环境评价模型包括水质评价模型、综合营养状态评价模型和水环境容量分析模型等。

A.1.1.1 水质评价模型可采用单因子评价法、综合污染指数法和内梅罗指数法等方法。

单因子评价法可采用公式A.1进行计算：

$$G = \text{Max}(G_i) \cdots \cdots \cdots (A.1)$$

式中：

G_i ——第*i*项污染物的水质类别。

综合污染指数法可采用公式A.2和A.3进行计算：

$$P = \sum_{i=1}^n P_i / n \cdots \cdots \cdots (A.2)$$

$$P_i = C_i / S_i \cdots \cdots \cdots (A.3)$$

式中：

P ——水质综合污染指数；

P_i ——第*i*项污染物单项污染指数；

C_i ——第*i*项污染物实测浓度，mg/L；

S_i ——第*i*项污染物环境质量标准，mg/L；

n ——污染物指标项数。

内梅罗指数法可采用公式A.4进行计算：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \cdots \cdots \cdots (A.4)$$

式中：

$P_{\text{综}}$ ——内梅罗指数；

P_{imax} ——各单因子环境质量指数中最大值；

\bar{P} ——各单因子环境质量指数的平均值；

其中 $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$, $P_i = \frac{C_i}{S_i}$ ；

其余符号意义同前。

A.1.1.2 综合营养状态评价模型可采用综合营养状态指数法，可参考公式A.5进行计算：

$$TLI(\Sigma) = \Sigma W_i \cdot TLI(i) \cdots \cdots \cdots (A.5)$$

式中：

$TLI(\Sigma)$ ——综合营养状态指数；

W_i ——第*i*项水质参数的营养状态指数的相关权重；

$TLI(i)$ ——第*i*项参数的营养状态指数。

A.1.1.3 水环境容量分析模型计算模型可参考公式A.6

$$W = [C_s - C_0 \exp(-K_1 \cdot x / u_x)](Q + q) \cdots \cdots \cdots (A.6)$$

式中：

C_s ——水质目标浓度，mg/L；

C_0 ——断面初始浓度，mg/L；

x ——沿河段纵向距离，m；

u_x ——河段平均流速，m/s；

K_1 ——污染物衰减系数，1/s；

Q ——断面流量，m³/s；

q ——污水排放量, m^3/s ;
 W ——河段水环境容量, g/s 。

A.1.2 水环境评价模型宜参考以下步骤构建:

- 收集基础资料: 收集区域范围、水文气象、水质等监测数据;
- 模型计算: 模型读取输入文件进行计算;
- 分析评价结果输出: 根据模型计算结果, 开展分析评价;
- 模型输入: 水质指标浓度监测数据及水文气象等监测数据;
- 模型输出: 水质类别、超标倍数、综合污染指数、营养状态指数等评价指标。

A.1.3 水环境评价模型宜参考下列要求进行选择:

- 目标水体单个点位的水质类别评价宜采用单因子评价法, 评价方法应符合GB 3838-2002的要求;
- 目标水体水质污染情况综合评价宜采用综合污染指数法或内梅罗指数法;
- 目标水体富营养化程度评价宜采用综合营养状态指数评价模型;
- 目标水体的水环境容量和纳污能力定量核算宜采用水环境容量分析模型。

A.2 水环境机理分析模型

A.2.1 水环境机理分析模型包括常规水质模型和突发水污染模型等。

A.2.2 常规水质模型根据应用场景可分为零维、一维、二维(包括平面二维及立面二维)以及三维水质模型

A.2.2.1 零维模型包括河流均匀混合模型和湖库均匀混合模型。

河流均匀混合模型可采用公式A.7进行计算:

$$C = (C_p Q_p + C_h Q_h) / (Q_p + Q_h) \quad (\text{A.7})$$

式中:

C ——污染物浓度, mg/L ;
 C_p ——污染物排放浓度, mg/L ;
 C_h ——河流上游污染物浓度, mg/L ;
 Q_p ——污水排放量, m^3/s ;
 Q_h ——河流流量, m^3/s 。

湖库均匀混合模型可采用公式A.8进行计算:

$$V \frac{dC}{dt} = W - QC + f(C)V \quad (\text{A.8})$$

式中:

V ——水体体积, m^3 ;
 t ——时间, s ;
 W ——单位时间污染物排放量, g/s ;
 Q ——水量平衡时流入与流出湖库的流量, m^3/s ;
 $f(C)$ ——生化反应项, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;
 其余符号意义同前。

A.2.2.1 一维模型包括水动力数学模型、水温数学模型、水质数学模型等基本模块。

水动力数学模型基本方程可参考公式A.9~A.11:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\delta z}{\delta x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$C = 1/n \cdot R^{1/6} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

Q ——断面流量, m^3/s ;
 q ——单位河长的旁侧入流, m^2/s ;
 A ——断面面积, m^2 ;
 Z ——断面水位, m ;
 C ——谢才系数, m ;
 n ——河道糙率;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 x ——笛卡尔坐标系 x 方向的坐标, m ;

其余符号意义同前。

水温数学模型基本方程可参考公式A.12: :

$$\frac{\partial(AT)}{\partial t} + \frac{\partial(uAT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + qT_L + \frac{BS}{\rho C_p} \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

T ——水温, $^{\circ}\text{C}$ 。
 E_{tx} ——水温纵向扩散系数, m^2/s ;
 S_T ——温度源项, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{s}$;
 T_L ——旁侧出入流(源汇项)水温, $^{\circ}\text{C}$;
 ρ ——水体密度, kg/m^3 ;
 C_p ——水的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 S ——表面积净热交换通量, W/m^2 ;

其余符号意义同前。

水质数学模型基本方程可参考公式A.13: :

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + Af(C) + qC_L \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

E_x ——污染物纵向扩散系数, m^2/s ;
 C_L ——旁侧出入流(源汇项)污染物浓度, mg/L ;

其余符号意义同前。

A. 2. 2. 2 平面二维模型包括水动力数学模型、水温数学模型、水质数学模型等基本模块。

水动力数学模型基本方程见公式A.14~A.16:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = hS \dots\dots\dots (A.14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + f v - \frac{g}{C_z^2} \cdot \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h} u + \frac{\tau_x}{\rho h} + A_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots (A.15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - f u - \frac{g}{C_z^2} \cdot \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h} v + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} + A_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots\dots (A.16)$$

式中:

u ——对应于 x 轴的平均流速分量, m/s ;
 v ——对应于 y 轴的平均流速分量, m/s ;
 h ——断面水深, m ;
 z_b ——河底高程, m ;
 f ——科氏系数, $f=2\Omega \sin$, $1/\text{s}$;

C_z ——谢才系数；

τ_{sx} 、 τ_{sy} ——分别为水面上的风应力， $\tau_{sx} = r^2 \rho_a w^2 \sin \alpha$ ， $\tau_{sy} = r^2 \rho_a w^2 \cos \alpha$ ， r^2 为风应力系数， ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ， w 为风速， m/s ， α 为风方向角；

A_m ——水平涡动粘滞系数， m^2/s ；

x ——笛卡尔坐标系X向的坐标， m ；

y ——笛卡尔坐标系Y向的坐标， m ；

S ——源（汇）项， $1/\text{s}$ ；

其余符号意义同前。

水温数学模型的基本方程可参考公式A.17：

$$\frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(uhT)}{\partial x} + \frac{\partial(vhT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_{tx} h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_{ty} h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{S_\phi}{\rho C_p} + h S T_s \cdots \cdots (A.17)$$

式中：

E_{tx} ——水温纵向扩散系数， m^2/s ；

E_{ty} ——水温横向扩散系数， m^2/s ；

S_ϕ ——水流边界面净获得的热交换通量，表示水流与外界（太阳、空气、河道边界）之间的热交换量， $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

T_s ——源（汇）项温度， $^\circ\text{C}$ ；

其余符号意义同前。

水质数学模型的基本方程可参考公式A.18：

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_{tx} h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_{ty} h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + hf(C) + h S C_s \cdots \cdots (A.18)$$

式中：

C_s ——源（汇）项污染物浓度， mg/L ；

其余符号意义同前。

A. 2. 2. 3 立面二维数学模型包括水动力数学模型、水温数学模型、水质数学模型等基本模块。

水动力数学模型基本方程可参考公式A.19~A.21：

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bv)}{\partial z} = Bq \cdots \cdots (A.19)$$

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial t} + \frac{\partial(Bu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(Bvu)}{\partial z} + \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(B A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\tau_{wx}}{\rho} \cdots \cdots (A.20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \cdots \cdots (A.21)$$

式中：

P ——压力， Pa ；

B ——过流面积， m^2 ；

A_h ——水平方向的涡粘性系数， m^2/s ；

A_z ——垂直方向的涡粘性系数， m^2/s ；

τ_{wx} ——边壁阻力， N ；

q ——旁侧出入流（源汇项）， $1/\text{s}$ ；

其余符号意义同前。

水温数学模型的基本方程可参考公式A.22~A.23：

$$\frac{\partial(BT)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (BuT) + \frac{\partial}{\partial z} (BwT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B E_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B E_{tz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial(B\Phi)}{\partial z} + BqT_L \cdots (A.22)$$

该公式符号意义同前。

水质数学模型的基本方程：

$$\frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(BuC) + \frac{\partial}{\partial z}(BwC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(BE_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(BE_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + BqC_L + Bf(C) \cdots (A.23)$$

该公式符号意义同前。

A. 2. 2. 4 三维数学模型包括水动力数学模型、水温数学模型、水质数学模型等基本模块。

水动力数学模型基本方程可参考公式A.24~A.27：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \cdots \cdots \cdots (A.24)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_h \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_z \frac{\partial u}{\partial z}\right) + 2\theta v \sin \phi + Su_s \cdots \cdots (A.25)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_h \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_z \frac{\partial v}{\partial z}\right) - 2\theta u \sin \phi + Sv_s \cdots \cdots (A.26)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \cdots \cdots \cdots (A.27)$$

式中：

θ ——地球自转角速度， ω/s ；

ϕ ——当地纬度， $^{\circ}$ ；

其余符号意义同前。

水温数学模型基本方程可参考公式A.28：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(E_u \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_u \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_u \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{q_r}{\rho C_p} + ST_s \cdots (A.28)$$

该公式符号意义同前。

水质数学模型基本方程可参考公式A.29：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + SC_s + f(C) \cdots (A.29)$$

该公式符号意义同前。

A. 2. 2. 5 常规水质模型可参考以下步骤构建：

- a) 数据收集：收集目标水域的地形、水文、气象、水质等数据；
- b) 网格划分：对模型水域进行划分，可采用结构化网格（矩形网格、正交曲线网格）、非结构化网格（三角网格）；
- c) 初始条件输入：确定模型计算初始时刻的状态值（初始时刻的流场、水质浓度场）；
- d) 边界条件输入：输入模型计算所需的边界条件，如入湖库流量边界、入湖库污染浓度边界、出湖库流量边界、湖库水位边界等；
- e) 模型参数设置：对模型的参数进行设置，如糙率、衰减系数等；
- f) 模型率定验证：采用实测数据对模型开展参数率定和验证工作；
- g) 模型输入：水下地形、水文、气象、水质、污染源、水工程调度等；
- h) 模型输出：湖库流场与水质浓度场分布及变化趋势。

A. 2. 2. 6 常规水质模型可参考下列要求进行选择：

- a) 对小型、相对封闭且水体混合较为均匀的湖库水体进行水质总体变化趋势的初步预报预警，以及某种污染物的一次性排放简单预演时，宜采用零维模型。
- b) 入（湖）库河流等狭长水体的水质预报预警，以及对污染物在河流中的扩散、迁移过程、对下游水质的影响及采取的应急措施（如在上游设置拦截设施、下游进行水质净化处理等）进行预演时，宜采用一维模型；

c) 宽浅型湖库水体表面水质变化的预报预警,以及对在水体表面发生的污染事件(如油污染、漂浮物污染等)进行预演时,宜采用平面二维模型。

d) 对水体在垂直方向上有一定分层现象的区域进行水质预报预警,以及对可能影响水体垂直分层的事件(如水库泄水、水温异常变化等)进行预演时,宜采用立面二维模型。

e) 大型深水湖库在不同季节、不同深度、不同区域的水质变化特征的预报预警,以及对水体中可能发生的各种污染事件的三维扩散过程进行预演时,宜采用三维模型。

A.2.3 突发水污染模型可参考以下步骤构建:

- a) 数据收集:收集目标水域的地形、水文、气象、水质、污染源等数据;
- b) 网格划分:对模型水域进行划分,可采用结构化网格(矩形网格、正交曲线网格)、非结构化网格(三角网格);
- c) 初始条件输入:确定模型计算初始时刻的状态值(初始时刻的流场、水质浓度场);
- d) 边界条件输入:输入模型计算所需的边界条件,出入湖库流量、湖库水位边界等;
- e) 模型参数设置:对模型的参数进行设置,如糙率、衰减系数等;
- f) 粒子投放设置:根据研究对象以及收集的资料,在研究位置投放合适的粒子数量;
- g) 模型输入:水下地形、水文、气象、污染物粒子位置及数量、工程调度等;
- h) 模型输出:模拟对象的水动力场以及污染运移轨迹和沉降特征。

A.3 数理统计模型

A.3.1 数理统计模型可分为统计学习模型和机器学习模型。

a) 统计学习模型利用统计原理和数学公式来描述数据之间的关系,并通过数据进行参数估计和模型训练。机器学习模型包括多元线性回归、门限回归、逐步回归、多元逐步回归、支持向量机、随机森林回归、梯度提升回归、均生函数等模型。

b) 机器学习模型通过学习数据中的模式和规律来进行预测、分类或其他任务。深度学习是机器学习的一个子领域,其模型通常具有更深的网络结构。

A.3.2 数理统计模型可参考以下步骤构建:

- a) 数据收集:收集目标水域的水文、气象、水质监测数据;
- b) 数据归一化处理:对原始数据进行标准化归一化处理;
- c) 训练样本构建:准备模型训练样本;
- d) 预报模型构建:选择和构建适合的预报模型;
- e) 模型训练及参数调整:对模型进行训练,调整模型参数,使其能够更好地适应数据;
- f) 基于模型进行预报:采用训练后的模型,开展预报作业;
- g) 模型输入:目标水域的水文(包括水位、流量、流向)、气象(包括气温、降水、光照、风力风向)、水质监测数据等长序列历史监测数据和实时监测数据;
- h) 模型输出:典型监测断面/点位的水质浓度变化趋势。

A.4 智能识别模型

A.4.1 智能识别模型可分为水质遥感反演模型和视频图像智能识别模型。

a) 视频图像智能识别模型通过构建多层网络,自动学习得到数据内部关系,提取图像重要特征,抽取关键信息,实现水面漂浮物、排污口排污、水体颜色异常、突发水污染、水华等水质信息智能识别。

b) 水质遥感反演模型基于卫星或无人机遥感影像,根据电磁波产生的遥感影像特征,结合地面监测数据或地物特征,训练智能反演模型,实现常规水质指标、面源污染、土地分

布、排污口分布等反演功能，适用于时间、空间维度上水质流域分析、水质动态分析、污染成因溯源等。

A. 4. 2 智能识别模型可参考以下步骤构建：

- a) 模型构建：图像或影像数据收集、标注，模型参数设置，模型训练，基于模型进行识别；
- b) 模型输入：图像数据集、图像标注信息文件；
- c) 模型输出：目标物像素位置、大小、种类等信息。

A. 5 可视化模型

A. 5. 1 可视化模型可分为基于图形学的水质可视化模型、基于图像的水质可视化模型。

a) 基于图形学的水质可视化模型。利用计算机图形学技术进行水质可视化。例如，通过绘制图形、曲线、曲面等几何元素来表示水质指标的变化情况。可以采用二维图形（如折线图、柱状图等）或三维图形（如 3D 模型、曲面图等）进行展示。

b) 基于图像的水质可视化模型。将水质数据转换为图像形式进行展示。例如，通过颜色映射将水质指标的值映射到颜色空间，生成彩色图像，以直观地展示水质的分布情况。通过图像合成技术，将不同时间帧的水质图像合成在一起，展示水质的动态变化过程。

A. 5. 2 可视化模型可参考以下步骤构建：

- a) 数据处理与转换：对水动力水质模拟计算结果按照规定的格式进行标准化转化；
- b) 信息渲染与表达：将标准化数据输入仿真模型，实现流场与水质浓度的可视化表达；
- c) 三维动态推演仿真：以动画形式实现流场与水质浓度场的三维动态推演仿真；
- d) 模型输入：水动力水质模型的计算结果；
- e) 模型输出：目标水体流场与浓度场的二三维仿真信息。

参考文献

- [1] 《水利部数字孪生平台水利专业模型输入输出数据结构规范（试行）》（办信息〔2024〕11号）。水利部, 2024.
- [2] 《水利部数字孪生平台水利专业模型封装技术要求（试行）》（办信息〔2024〕12号）。水利部, 2024.
- [3] 《数字孪生流域建设技术大纲（试行）》（水信息〔2022〕147号）。水利部, 2022.
- [4] 《数字孪生水利工程建设技术导则（试行）》（水信息〔2022〕148号）。水利部, 2022.
- [5] 《水利业务“四预”基本技术要求（试行）》（水信息〔2022〕149号）。水利部, 2022.