

团 体 标 准

T/CSES 72—2022

# 流域水环境模型评估验证技术指南

Technical guidance on evaluation of environmental models for watershed  
management

(发布稿)

2022-11-08 发布

2022-11-08 实施

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总体原则和要求 .....	3
5 管理决策目标分析 .....	4
6 模型适用性初步评估 .....	5
7 模型结构特征评估 .....	5
8 模型数据质量评估 .....	7
9 模型模拟性能评估 .....	8
10 模型决策功能评估 .....	10
11 评估验证报告编制 .....	11
附录 A（规范性）流域水环境模型评估验证指标体系和支撑技术 .....	12
附录 B（资料性）流域水环境模型评估验证技术清单 .....	13
附录 C（资料性）典型流域水环境模型的适用条件 .....	15
附录 D（资料性）流域水环境模型模拟效果评价指标及其精度参考值 .....	18
附录 E（资料性）流域水环境模型评估验证报告提纲 .....	19
参考文献 .....	22

## 前 言

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。

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专利的责任。

本文件由清华大学提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件起草单位：清华大学。

本文件主要起草人：孙傅、秦成新、荣易、刘毅、杜鹏飞、曾思育、董欣。

# 流域水环境模型评估验证技术指南

## 1 范围

本文件规定了流域水环境模型评估验证的总体原则和要求、管理决策目标分析、模型适用性初步评估、模型结构特征评估、模型数据质量评估、模型模拟性能评估、模型决策功能评估、评估验证报告编制等内容。

本文件适用于支持管理决策的流域水环境模型的评估验证，其它类型和用途的流域水环境模型的评估验证可参照本文件执行。

## 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/T 22482 水文情报预报规范
- GB/T 50138 水位观测标准
- GB 50179 河流流量测验规范
- HJ 91.1 污水监测技术规范
- HJ 493 水质 样品的保存和管理技术规定
- HJ 494 水质 采样技术指导
- HJ 495 水质 采样方案设计技术规定
- HJ 819 排污单位自行监测技术指南 总则
- HJ 915 地表水自动监测技术规范（试行）
- SL 58 水文测量规范
- SL 59 河流冰情观测规范
- SL 196 水文调查规范
- SL 257 水道观测规范
- SL/T 278 水利水电工程水文计算规范
- SL 339 水库水文泥沙观测规范
- SL/T 784 水文应急监测技术导则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**流域水环境模型** environmental model for watershed management

模拟地表水体及其集水区域中水、污染物、生物等迁移和转化过程的数学模型，通常包括水文、水动力、水质、水生态等功能模块。

### 3.2

**模型概化** model conceptualization

抽象和简化模拟对象的系统组成、特征、行为、机理及其关键影响因素的过程。

### 3.3

**模型评估验证** model evaluation

为确定模型及其结果质量是否适宜支持管理决策而收集和产生信息的过程。

3.4

**变量 variable**

描述模拟对象的系统状态以及输入和输出特征、随时间或空间变化且可观测或可估计的量。

3.5

**参数 parameter**

描述模拟对象系统过程特征而不依赖于时间或空间以及变量的常量。

3.6

**参数率定 parameter calibration**

在合理范围内调整模型参数取值，使模型输出结果与观测数据之间偏差达到一定要求的过程。

3.7

**参数验证 parameter validation**

利用参数率定得到的模型参数和独立于参数率定数据的观测数据，检验模型模拟效果的过程。

3.8

**边界条件 boundary condition**

描述模拟对象系统边界上变量及其变化率并对系统状态具有决定作用的数据集。

3.9

**灵敏度 sensitivity**

模型输出受模型假设、输入、参数等变化的影响程度。

3.10

**不确定性 uncertainty**

模型机理、参数取值、输入数据、观测误差等存在的知识空白。

3.11

**可识别性 identifiability**

在一定的模型结构和观测数据条件下，模型从理论上可求解并获得唯一或有限数量参数取值的能力。

3.12

**稳健性 robustness**

模型在其全部适用范围内均具有良好模拟性能的能力。

3.13

**机理模型 mechanistic model**

基于对模拟对象物理、化学、生物等过程的认识，建立的可定量表征模拟对象行为与内在机理之间因果关系的模型。

3.14

**经验模型 empirical model**

基于观测数据之间相关关系建立的可用于定量模拟对象行为的模型。

3.15

**等效性 equifinality**

不同的模型结构、参数取值等产生相同模拟效果的现象。

## 3.16

**回顾评价 retrospective assessment**

利用流域或水体的历史数据，分析水量、水质、水生态、污染物排放状况及其时空变化特征等，进而对污染源贡献、水环境容量、污染防治效果、自然环境变化等做出评价和决策的过程。

## 3.17

**预警应急 real-time alert and response**

利用实时数据以及风险预警、污染溯源等机制，识别、预警流域或水体的自然灾害、事故污染等突发事件，预测突发事件演化趋势及其对生态环境、经济社会等的影响，评估应急预案效果，进而对突发事件影响、应急预案实施等做出评价和决策的过程。

## 3.18

**规划评估 planning assessment**

基于流域或区域的水资源、水环境和水生态现状条件，分析未来经济社会发展相关政策规划和建设项目以及自然环境变化等对流域或水体的影响，评估污染防治等应对措施的必要性和效果，进而对政策规划和建设项目的环境影响、自然环境变化的影响、污染防治措施实施等做出评价和决策的过程。

**4 总体原则和要求****4.1 总体原则****4.1.1 需求导向**

流域水环境模型评估验证的目的是为了检验模型是否适宜支持管理决策，不同的决策需求对模型功能要求不同，评估验证内容和技术要求应与决策需求相适应。

**4.1.2 分类评估**

流域水环境模型的模拟对象、建模方法、开发和应用基础、决策应用潜在的风险等存在差异，其评估验证内容和技术要求应结合实际、差别化处理。

**4.1.3 应用支撑**

流域水环境模型评估验证除了做出模型是否适宜支持管理决策的结论之外，还应结合评估验证过程得到的结果为模型在实际决策中的合理、规范应用提供技术建议。

**4.2 总体要求**

**4.2.1** 流域水环境模型在服务国家或地方相关主管部门的管理决策之前，应开展评估验证，评价其对相应管理决策目标的适用性，充分考虑并降低不确定条件下的管理决策风险。

**4.2.2** 流域水环境模型评估验证应包括管理决策目标分析、模型适用性初步评估、模型结构特征评估、模型数据质量评估、模型模拟性能评估、模拟决策功能评估、评估验证报告编制七个步骤，技术框架见图 1。

**4.2.3** 模型结构特征评估、模型数据质量评估、模型模拟性能评估、模型决策功能评估的评价指标体系和支撑技术应符合附录 A 要求，可采用附录 B 所列技术针对各项评价指标开展评估验证。

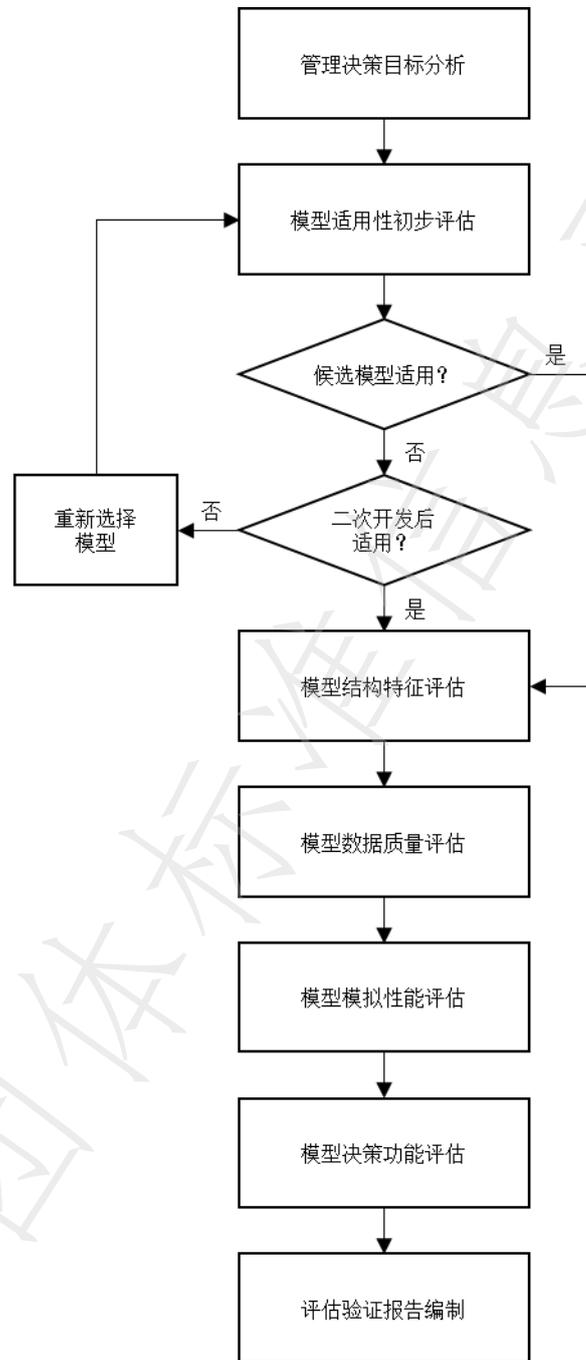


图 1 流域水环境模型评估验证技术框架

## 5 管理决策目标分析

5.1 应明确流域水环境模型所需支持的管理决策目标，分析不同管理决策目标对模型应用的要求。管理决策目标包括回顾评价、预警应急和规划评估。

5.2 用于回顾评价决策的流域水环境模型宜符合以下规定：

- a) 模拟的时间精度可为日、月或年；
- b) 应对均值、总量、通量类指标具有较好的模拟效果；

c) 若管理决策涉及风险评价, 应对极值类指标具有较好的模拟效果。

5.3 用于预警应急决策的流域水环境模型宜符合以下规定:

- a) 模拟的时间精度宜达到日、小时或更短;
- b) 应对极值、时间分布、空间分布类指标具有较好的模拟效果;
- c) 应具有较高的计算效率。

5.4 用于规划评估决策的流域水环境模型宜符合以下规定:

- a) 模拟的时间精度可为日、月或年;
- b) 应对均值、总量、通量类指标具有较好的模拟效果;
- c) 若管理决策涉及风险评价, 应对极值类指标具有较好的模拟效果。

## 6 模型适用性初步评估

6.1 初步评估宜按照以下步骤进行:

- a) 结合管理决策目标需求(见第5章), 通过文献调研、市场调研等方式遴选候选的流域水环境模型, 典型流域水环境模型及其适用条件可参考附录C;
- b) 应评估候选模型的模拟变量、模拟方式、时间和空间精度、计算效率等与管理决策目标的匹配程度, 以及模型所需数据的可获得性(参照8.1.1.1);
- c) 若候选模型不适用, 但其具备二次开发条件且二次开发后可能适用, 则可在完成二次开发后重新评估其适用性;
- d) 候选模型或经过二次开发后的候选模型适用, 则初步评估完成; 反之, 应重新选择候选模型, 重复上述步骤。

6.2 初步评估可判定模型不适用的情形包括但不限于以下种类:

- a) 模拟变量未包含管理决策相关的观测指标、调控手段等, 或未能与之建立关联关系;
- b) 模拟的时间动态性、空间维度等无法满足管理决策需求;
- c) 模拟结果的时间和空间分辨率未达到管理决策所需的精度;
- d) 计算效率无法满足管理决策的时效性要求;
- e) 在管理决策允许的时间、资源等条件下, 可获得的数据无法满足模型模拟需求, 且无合理可行的数据替代措施。

## 7 模型结构特征评估

7.1 通用要求

7.1.1 建模机理

7.1.1.1 模型概化宜符合以下规定:

- a) 应基于模拟对象的实际和科学合理的假设, 概化模拟对象的系统组成、特征、行为等;
- b) 应服务管理决策目标, 涵盖与决策目标相关的系统主要组成、特征、行为等, 保持较好的完备性;
- c) 应保持适宜的复杂度, 以精简、适用为原则, 有针对性细化或简化系统部分组成、特征、行为等的概化方式;
- d) 模型概化的合理性及其与管理决策目标的匹配度可采用附录B的同行评议技术评估。

7.1.1.2 模型机理设计宜符合以下规定:

- a) 模拟对象系统特征和行为的机理设计应与现有理论和知识相符;
- b) 若现有理论和知识依据不足, 机理设计应有充分的观测数据支持或者已经过模型应用检验被证

明合理；

- c) 模型机理的科学性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 7.1.2 数学表达

#### 7.1.2.1 数学表达形式宜符合以下规定：

- a) 应与模型概化和机理设计相符，具有充分的理论依据或观测数据支持，或者已经过模型应用检验被证明合理；
- b) 应精简模型参数设置，避免出现参数冗余、参数间高度相关等影响参数可识别性的问题；
- c) 数学表达形式的合理性及其与管理决策目标的匹配度可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 7.1.2.2 变量和参数定义宜符合以下规定：

- a) 模型应包含与管理决策目标直接相关的变量和参数；
- b) 模型输入、输出以及中间过程关键变量应可观测，在合理的经济技术条件下可获得足够的观测数据；
- c) 模型参数应相互独立，宜使用具有明确物理意义且可观测的参数；
- d) 变量和参数定义的合理性及其与管理决策目标的匹配度可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 7.1.3 求解算法

#### 7.1.3.1 算法设计宜符合以下规定：

- a) 模型的求解算法应与模型的数学表达形式相匹配，求解算法选择应符合以下要求：
  - 1) 当数学表达形式可求得解析解时，应优先使用解析解；
  - 2) 当数学表达形式复杂、难以求得解析解时，应使用数值算法求解；
- b) 应测试时间和空间离散化水平、收敛条件等算法设置对模型模拟结果的影响，保证算法的稳定性和收敛性；
- c) 算法设计的合理性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 7.1.3.2 算法精度宜符合以下规定：

- a) 应通过调整和优化求解算法的计算条件，使模型模拟结果在稳定、收敛的前提下，符合管理决策目标对其时间和空间精度、误差水平、计算效率等的要求；
- b) 算法精度的有效性及其与管理决策目标的匹配度可采用附录 B 的同行评议技术评估。

## 7.2 成熟模型

7.2.1 已得到广泛应用的、成熟的模型，可省略或适当简化模型结构特征评估。

7.2.2 基于成熟模型二次开发得到的模型的结构特征评估应符合以下要求：

- a) 若二次开发未涉及建模机理、数学表达和求解算法，可省略或适当简化模型结构特征评估；
- b) 若二次开发修改了建模机理、数学表达或求解算法，应根据修改涉及的范围，开展相应的模型结构特征评估。

## 7.3 经验模型

可通过数学实验方法，分析经验模型模拟变量与输入之间的内在关系是否与现有理论和知识相符、是否存在过拟合或欠拟合等，由此评估模型结构的合理性。

## 7.4 商业软件

7.4.1 可根据商业软件说明书及其他公开发表资料提供的模型建模机理、数学表达和求解算法相关信息，评估模型结构的合理性。

7.4.2 已得到广泛应用的商业软件可参照成熟模型省略或适当简化模型结构特征评估。

## 8 模型数据质量评估

### 8.1 通用要求

#### 8.1.1 数据完备性

##### 8.1.1.1 数据可获得性宜符合以下规定：

- a) 应通过收集历史数据、采集实时数据、现场观测、实验室测定等方式获取模型输入、变量和参数等；
- b) 因客观条件限制，可获得的数据无法满足模型运行的基本要求而又亟需应用模型服务管理决策时，应采取合理的数据替代措施（见 8.2）；
- c) 模型数据的可获得性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

##### 8.1.1.2 数据代表性宜符合以下规定：

- a) 用于模型构建和评估验证的数据应具有充分的代表性，包含模拟对象的主要组成、属性特征、系统过程等，涵盖典型时段和空间点位并达到管理决策目标要求的时间和空间精度，充分体现主要输入、变量等的变化范围；
- b) 若管理决策涉及特殊或极端环境条件，宜获取相似环境条件下的观测数据；
- c) 模型数据的代表性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 8.1.2 数据质量

##### 8.1.2.1 数据规范性宜符合以下规定：

- a) 应优先采用国家或地方相关主管部门或权威机构提供的标准化数据，此类数据可认为符合规范性要求；
- b) 自行开展调查和监测获取数据时，应优先执行国家相关主管部门制定的技术标准并符合以下要求：
  - 1) 水文调查和监测应符合 GB/T 22482、GB/T 50138、GB 50179、SL 58、SL 59、SL 196、SL 257、SL/T 278、SL 339、SL/T 784 等的要求；
  - 2) 水环境调查和水质监测应符合 HJ 91.1、HJ 493、HJ 494、HJ 495、HJ 819、HJ 915 等的要求；
  - 3) 调查和监测过程中应做好数据质量保证和质量控制并保留相关记录，以备查证；
  - 4) 若数据质量保证和质量控制措施齐全，可省略或适当简化数据规范性评估；
  - 5) 若数据质量保证和质量控制措施不齐全，可采用附录 B 的数据质量评估技术评估数据的规范性；
- c) 通过国家或地方相关主管部门或权威机构之外的其他途径获取数据，或采用非标准方法自行开展调查和监测获取数据，应符合以下要求：
  - 1) 应说明数据获取的具体来源、技术方法等并提供相关记录，以备查证；
  - 2) 调查和监测过程中应做好数据质量保证和质量控制并保留相关记录，以备查证；
  - 3) 可采用附录 B 的数据质量评估技术并参照相关技术标准评估数据的规范性。

##### 8.1.2.2 数据匹配性宜符合以下规定：

- a) 模型采用的不同类型数据宜在观测或统计的时刻、点位、时间长度、空间范围、时间和空间分辨率等方面相互匹配；
- b) 模型输入数据的时间和空间精度应不低于管理决策目标对模拟结果时间和空间精度的要求；
- c) 若模拟对象的特征在模拟时段内发生重大变化，应使用相应的输入数据，分阶段开展模型模拟；
- d) 模型数据的匹配性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 8.1.3 定解条件

#### 8.1.3.1 边界条件应符合以下规定：

- a) 应符合模拟对象的实际特征，并与现有理论和知识相符；
- b) 应根据管理决策目标的要求设置边界条件，其中：
  - 1) 若模型应用于回顾评价决策，应根据模拟对象的历史数据设定边界条件；
  - 2) 若模型应用于预警应急决策，应优先根据模拟对象的实时数据及其变化趋势设定边界条件，实时数据不可获取时，可参考历史数据或管理决策可能涉及的极端情况设定边界条件；
  - 3) 若模型应用于规划评估决策，可参考模拟对象的历史数据或管理决策可能涉及的极端情况设定边界条件；
- c) 边界条件设定的合理性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 8.1.3.2 初始条件应符合以下规定：

- a) 应符合模拟对象的实际特征，并与现有理论和知识相符；
- b) 应优先使用模拟对象的观测数据设定初始条件；
- c) 对于可开展连续模拟的模型，若初始条件的观测数据难以获取或存在较大不确定性，可通过在模拟时段前设置模型预热期，降低初始条件对后续模拟的影响；
- d) 初始条件设定的合理性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 8.2 缺失数据

8.2.1 当可获得的数据无法满足模型运行的基本要求时，应采取合理的数据替代措施，并评估缺失数据对模型模拟结果和管理决策的影响（见 9.3）。在条件具备时，应及时开展全面调查和监测，重新开展模型评估验证。

8.2.2 当模型的输入或模拟变量数据缺失时，可采取以下数据替代措施：

- a) 若模型的输入或模拟变量的部分数据缺失，可采用时间或空间插值等方法生成替代数据；
- b) 若待评估验证的模型的输入或模拟变量可由其他模型模拟得到，而后者已经过评估验证并且对前者可获得的数据模拟效果较好，则可使用后者的模拟结果替代缺失数据；
- c) 若模拟对象与邻近流域、区域或水体的生态环境和经济社会特征相似，而相似流域、区域或水体具备较为完善的数据，则可基于二者之间数据的相关关系生成模拟对象的替代数据。

8.2.3 当模型参数缺少现场观测或实验室测定数据时，可采用相似流域、区域或水体的参数取值以及文献中参数取值、经验公式估算值替代，或者将其作为待率定参数处理。

## 9 模型模拟性能评估

### 9.1 模型参数

9.1.1 参数率定方法应符合以下规定：

- a) 已通过现场观测或实验室测定获得模拟对象的相关参数时，可按照以下方式开展参数率定：
  - 1) 可将已获得的参数取值直接带入模型，减少待率定参数的数量；
  - 2) 可将这些参数作为待率定的模型参数，已获得的参数取值可用于辅助设置参数率定的初值或先验分布以及检验参数率定结果的合理性；
- b) 宜在参数率定前开展参数灵敏度分析（见 9.1.2），识别并优先率定其中的灵敏参数，提高参数率定的计算效率；
- c) 参数率定可采用手动率定、自动率定或两者结合的方法，按照以下方式进行：
  - 1) 手动率定可与附录 B 中模拟效果的图示评价技术联合使用；
  - 2) 自动率定可采用附录 B 中基于定向搜索和最优化的单一解识别技术，获得最优的模型参数组，也可采用基于采样和贝叶斯理论的多重解识别技术，获取各模型参数的后验分布；
- d) 应合理设置参数率定的初值或先验分布，利用不同系统过程、模拟变量、观测点位、环境条件

的观测数据开展参数率定，选择不同类型的模拟效果评价指标等方法，规避或降低参数等效性的影响；

- e) 当模拟对象的不同系统过程之间存在变量、参数等调用关系时，宜优先率定前置系统过程涉及的参数；
- f) 当模型模拟值与观测值在部分时间或空间范围内出现系统偏差时，宜按照以下方式处理：
  - 1) 可分时段或分区域率定参数，获得不同时段或区域的参数取值；
  - 2) 若可从分时段或分区域率定的参数取值中识别模型输入、模拟变量等的影响，则可在分析模型机理合理性的基础上修正模型结构，重新率定模型参数。

#### 9.1.2 参数灵敏度分析宜符合以下规定：

- a) 灵敏度分析覆盖的参数范围可按照以下原则确定：
  - 1) 结构简单的模型可针对全部参数开展灵敏度分析；
  - 2) 结构复杂的模型可在初步筛选的基础上针对部分关键参数开展灵敏度分析；
- b) 参数灵敏度分析可采用附录 B 的灵敏度分析技术和随机采样技术；
- c) 宜利用灵敏度分析结果和参数率定结果（见 9.1.3），评估模型结构的合理性以及模拟结果的可靠性，结果包括但不限于以下情形：
  - 1) 当高灵敏度参数对应的系统过程不是关键过程，或系统关键过程对应的参数不灵敏时，模型结构或参数率定结果可能存在问题；
  - 2) 当不灵敏或低灵敏度参数所占比例过高时，模型可能存在过参数化的问题；
  - 3) 当高灵敏度参数可直接观测或具有好的可识别性时，模型模拟结果的可靠性较高。

#### 9.1.3 参数率定结果宜符合以下规定：

- a) 宜将参数率定结果与参数的现场观测值或实验室测定值、相同模型在同一流域或类似流域的参数取值、类似模型参数取值等可比数据进行比较，说明参数率定结果的合理性及其与可比数据出现偏差的原因；
- b) 可利用模型模拟得到的物质通量、中间过程量、源解析、多介质分配等结果，进一步验证参数率定结果及模型机理设计的合理性；
- c) 参数率定结果的合理性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 9.2 模拟效果

#### 9.2.1 模型模拟值与观测值之间的误差应满足管理决策目标要求。

#### 9.2.2 模型模拟效果评价宜分参数率定和参数验证两个阶段进行，要求如下：

- a) 参数率定阶段应结合率定得到的最优参数组或参数后验分布，评价模型的模拟效果；
- b) 参数验证阶段应基于率定得到的模型参数，利用独立于参数率定数据的观测数据，检验模型的模拟效果；
- c) 参数率定和参数验证两个阶段使用的观测数据可按时间、空间、环境特征等不同方式分配，以提高模型模拟性能的稳健性。

#### 9.2.3 模型模拟效果评估技术和评价指标的选择宜符合以下规定：

- a) 应根据管理决策目标对不同类型指标模拟效果的需求（见第 5 章），选用附录 B 中对管理决策目标敏感的技术开展模型模拟效果评估；
- b) 模拟效果优劣可参照附录 D 提供的典型评价指标的精度参考值进行评价；
- c) 当模拟变量的观测频率为日及以下、观测数据存在较大不确定性时，模型的模拟精度要求可适当放宽。

#### 9.2.4 当候选模型不是广泛应用的模型时，宜同时选择成熟模型应用于当前的模拟对象，比较候选模型和成熟模型模拟效果的差异。

9.2.5 当管理决策可能存在重大经济、社会 and 环境影响时，必须开展多模型评价，且评价指标的精度应从严要求。

### 9.3 模型不确定性

9.3.1 模型输入和参数不确定性表征应符合以下规定：

- a) 模型输入的不确定性可依据输入变量统计特征、未来情景设计、其他模型输出结果等设定；
- b) 模型参数的不确定性可结合参数率定、参数灵敏度分析等结果设定；
- c) 根据管理决策目标需要和可获得的信息，模型输入和参数的不确定性可用概率分布、取值范围、离散取值、定性描述等形式表征；
- d) 模型输入和参数不确定性表征方式的合理性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

9.3.2 模拟结果不确定性分析应符合以下规定：

- a) 根据管理决策目标需要和可获得的模型输入和参数不确定性的表征方式，可采用以下方法分析模型模拟结果的不确定性：
  - 1) 当模型输入或参数的不确定性以定性描述或离散取值表征时，可按其可能变化趋势设定若干取值或直接使用离散取值，采用附录 B 的灵敏度分析技术，评价模拟结果的变化趋势；
  - 2) 当模型输入和参数的不确定性以概率分布和取值范围形式表征时，可采用附录 B 的不确定性分析技术和随机采样技术，输出模拟结果的概率分布、置信区间等；
- b) 在条件具备时，可进一步解析模型输入和参数对模拟结果不确定性的贡献，并采用附录 B 的灵敏度分析技术，识别影响模拟结果及其不确定性的关键输入和参数，提出降低模拟结果不确定性和管理决策风险的措施；
- c) 当表征管理决策调控手段的模型输入或参数对模拟结果及其不确定性的影响不显著时，应分析原因，必要时做出调整，以提高管理决策的有效性。

## 10 模型决策功能评估

### 10.1 决策实用性

10.1.1 模型计算效率应符合以下规定：

- a) 模型计算效率应满足管理决策的时效性要求；
- b) 模型计算效率与管理决策目标的匹配度可采用附录 B 的同行评议技术评估。

10.1.2 模型业务化运行的数据条件应符合以下规定：

- a) 对于需要长期利用模型服务的管理决策，在正常业务状态下模型所需各项数据的更新频率应满足以下要求：
  - 1) 回顾评价决策宜按相关工作开展的周期，集中更新模型所需数据；
  - 2) 预警应急决策使用的地理信息等基础数据的更新频率宜达到每三年一次或更高，气象、污染源、水体等数据的更新频率宜达到每小时一次或更高；
  - 3) 规划评估决策宜按相关工作开展的周期，集中更新模型所需数据；
- b) 模型业务化运行时数据的可获得性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

10.1.3 模型业务化运行的软硬件条件应符合以下规定：

- a) 对于需要长期利用模型服务的管理决策，在正常业务状态下应具备模型应用所需的计算机软件和硬件、技术人员、运行维护经费等条件；
- b) 模型业务化运行时软硬件的可获得性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 10.2 应用便利性

10.2.1 模型操作便利程度应符合以下规定：

- a) 模型宜具备可视化、自动化的输入数据准备功能，可视化、图表化的模拟结果分析功能，标准化、易读写的输入输出文件格式等。
- b) 模型操作的便利程度可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 10.2.2 模型技术服务支撑宜符合以下规定：

- a) 应提供模型机理说明书、模型使用说明书等技术文档；
- b) 在条件具备时，可组建客户服务团队，定期评估模型业务化运行的模拟效果；
- c) 模型业务化运行时技术服务支撑的可获得性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

#### 10.2.3 模型可扩展性宜符合以下规定：

- a) 模型宜具有可扩展性，设置标准化接口、输入输出文件等；
- b) 模型宜采用模块化设计，模块间通过变量、参数等连接，运算时互不干扰，并可根据管理决策目标要求选用相关模块；
- c) 模型代码宜为开源代码，便于二次开发；
- d) 模型的可扩展性可采用附录 B 的同行评议技术评估。

### 11 评估验证报告编制

11.1 流域水环境模型评估验证报告可参照附录 E 的评估验证报告提纲编写，总结第 5 章至第 10 章的评估验证结果，综合评价候选模型对于管理决策目标的适用性，并对适用模型在管理决策中的应用提出技术要求和建议。

11.2 流域水环境模型评估验证报告可作为国家或地方相关主管部门在管理决策中采纳该候选模型及其模拟结果的主要依据。

附 录 A  
(规范性)

流域水环境模型评估验证指标体系和支撑技术

表A.1规定了流域水环境模型评估验证的指标体系和支撑技术。

表 A.1 流域水环境模型评估验证指标体系和支撑技术

评估验证内容		评价指标	支撑技术	
模型结构特征评估	建模机理	模型概化	同行评议技术	
		模型机理		
	数学表达	数学表达形式		
		变量和参数定义		
	求解算法	算法设计		
		算法精度		
模型数据质量评估	数据完备性	数据可获得性	数据质量评估技术	
		数据代表性		
	数据质量	数据规范性		同行评议技术
		数据匹配性		
	定解条件	边界条件设定		
		初始条件设定		
模型模拟性能评估	模拟效果	模型模拟效果	模拟效果评估技术	
	模型参数	参数率定方法	参数识别技术 随机采样技术	
		参数率定结果	同行评议技术	
		参数灵敏度	灵敏度分析技术 随机采样技术	
	模型不确定性	模型输入和参数不确定性	同行评议技术	
		模拟结果不确定性	不确定性分析技术 随机采样技术	
模型决策功能评估	决策实用性	计算效率	同行评议技术	
		数据条件		
		软硬件条件		
	应用便利性	操作便利程度		
		技术服务支撑		
		模型可扩展性		

附 录 B  
(资料性)  
流域水环境模型评估验证技术清单

表B.1提出了流域水环境模型评估验证技术清单。

表 B.1 流域水环境模型评估验证技术清单

一级体系	二级体系	三级体系
1 同行评议技术	1.1 同行匿名评审 1.2 同行通讯评审 1.3 同行会议评审	-
2 数据质量评估技术	2.1 数据完备度评价技术	同 1.1-1.3
	2.2 数据准确度评价技术	2.2.1 均值 2.2.2 中位数 2.2.3 众数
	2.3 数据精密度的评价技术	2.3.1 范围 2.3.2 方差 2.3.3 标准偏差 2.3.4 变异系数 2.3.5 四分位距
3 模拟效果评估技术	3.1 图示评价技术	3.1.1 散点图 3.1.2 Q-Q 图 3.1.3 时间序列图
	3.2 误差评价技术	3.2.1 平均偏差 3.2.2 平均绝对误差 3.2.3 平均百分比绝对偏差 3.2.4 均方误差 3.2.5 均方根误差 3.2.6 百分比偏差 3.2.7 均方根误差与观测值标准偏差比 3.2.8 纳什效率系数 3.2.9 修正纳什效率系数
	3.3 无量纲评价技术	3.3.1 相关系数 3.3.2 斯皮尔曼秩相关系数 3.3.3 克林-古普塔效率系数 3.3.4 柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验统计量
	3.4 多模型评价技术	3.4.1 验证性评价 3.4.2 预测性评价
4 参数识别技术	4.1 单一解识别技术	4.1.1 局部搜索技术 4.1.2 全局搜索技术
	4.2 多重解识别技术	4.2.1 Hornberger-Spear-Young 算法 4.2.2 广义似然不确定性估计方法 4.2.3 序列不确定性拟合方法 4.2.4 马尔可夫链蒙特卡洛方法
5 灵敏度分析技术	5.1 “一次一个”灵敏度分析方法 5.2 Hornberger-Spear-Young 算法 5.3 多元回归分析方法 5.4 Sobol 灵敏度分析方法	-
6 不确定性分析技术	6.1 Hornberger-Spear-Young 算法 6.2 广义似然不确定性估计方法 6.3 序列不确定性拟合方法 6.4 马尔可夫链蒙特卡洛方法 6.5 ParaSol 方法	-

一级体系	二级体系	三级体系
7 随机采样技术	7.1 简单随机采样 7.2 拉丁超立方采样 7.3 准蒙特卡洛采样 7.4 基于马尔科夫链的采样	-

附 录 C  
(资料性)  
典型流域水环境模型的适用条件

表C.1给出了典型的非点源污染模型和地表水体模型的适用条件。

表 C.1 典型流域水环境模型的适用条件

模拟对象	模型名称	模拟变量	模型输入	模拟方式	时间精度	其他条件	参考文献
非点源污染	AGricultural Non-Point Source model (AGNPS) / Annualized Agricultural Non-Point Source model (AnnAGNPS)	水位、流速、流量、蒸散发量、泥沙、水温、氮、磷、化学需氧量、有机碳、农药等	数字高程模型、土地利用分布、土壤分布及属性、气象数据、点源排放量、农业管理措施、水文、水质等	连续、事件	日及以下	农业用地为主的流域	[1-3]
非点源污染	Hydrologic Simulation Program FORTRAN (HSPF) / Loading Simulation Program in C++ (LSPC)	水位、流速、流量、蒸散发量、泥沙、水温、氮、磷、生化需氧量、溶解氧、藻类、细菌、农药等	数字高程模型、土地利用分布、土壤分布及属性、气象数据、污水排放量和取水量、污染负荷、土地管理措施、水文、水质等	连续、事件	日及以下	农业用地为主的流域	[2-7]
非点源污染	MIKE SHE	水位、流速、流量、蒸散发量、泥沙、水温、氮、磷、生化需氧量、溶解氧、藻类、细菌、农药、作物生长等	数字高程模型、土地利用分布、土壤分布及属性、气象数据、污染负荷、土地管理措施、水文、水质等	连续、事件	日及以下	农业用地为主的流域	[2,7,8]
非点源污染	Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	水位、流速、流量、蒸散发量、泥沙、水温、氮、磷、生化需氧量、溶解氧、藻类、细菌、农药、作物生长等	数字高程模型、土地利用分布、土壤分布及属性、气象数据、污水排放量和取水量、污染负荷、土地管理措施、水文、水质等	连续、事件	日	农业用地为主的流域	[2,3,7,9]
非点源污染	Storm Water Management Model (SWMM)	水位、流速、流量、泥沙、自定义的水质指标等	数字高程模型、土地利用分布、排水管网布局及属性、气象数据、污水排放量和取水量、污染负荷、径流管理措施、水文、水质等	连续、事件	小时以下	城镇用地为主的流域	[2,3,10]

模拟对象	模型名称	模拟变量	模型输入	模拟方式	时间精度	其他条件	参考文献
非点源污染	新安江模型	水位、流速、流量、蒸散发量、泥沙、氮、磷等	数字高程模型、土地利用分布、土壤分布及属性、气象数据、水文、水质等	事件	小时及以下	多种流域，包括资料相对缺乏的流域	[11,12]
地表水体	河流均匀混合模型	自定义的水文水质指标	河流流量和上游污染物浓度、污水排放量、污染物排放浓度等	零维	日、小时	污染物均匀混合的河流	[13]
地表水体	湖库均匀混合模型	自定义的水文水质指标	水体体积、单位时间污染物排放量、水量平衡时流入与流出湖库的流量等	零维	日、小时	水体交换充分、污染物分布均匀的湖库	[13]
地表水体	狄龙（Dillon）模型	氮、磷	水体体积、单位时间和单位面积进入湖库的污染负荷、平均水深、单位时间流入与流出湖库的水量和污染物平均浓度等	零维	年	水体交换充分、污染物分布均匀的湖库	[13]
地表水体	纵向一维模型	水位、流速、流量、自定义的水文水质指标等	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	纵向一维	小时及以下	污染物在沿程横断面上均匀混合的河流或河道型水库	[13]
地表水体	平面二维模型	水位、流速、流量、自定义的水文水质指标等	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	平面二维	小时及以下	污染物在垂向上均匀混合的大河、湖库、河口及近海宽浅水体	[13]
地表水体	立面二维模型	水位、流速、流量、自定义的水文水质指标等	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	立面二维	小时及以下	污染物在横向上分布差异不明显但垂向分层明显的深水河流和湖库	[13]
地表水体	三维模型	水位、流速、流量、自定义的水文水质指标等	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	三维	小时及以下	污染物在垂向和水平面上分布差异明显的河流、湖库、河口、近海等	[13]
地表水体	QUAL2K	水位、流速、流量、泥沙、水温、氮、磷、生化需氧量、底泥需氧量、溶解氧、藻类、细菌等	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	纵向一维	稳态	污染物在沿程横断面上均匀混合的河流或河道型水库	[14-16]

模拟对象	模型名称	模拟变量	模型输入	模拟方式	时间精度	其他条件	参考文献
地表水体	MIKE HYDRO River / MIKE 11	水位、流速、流量、泥沙、水温、盐度、氮、磷、硅、生化需氧量、溶解氧、藻类、细菌等，允许自定义变量	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	纵向一维	小时及以下	河流、水库、河口等	[15,17]
地表水体	MIKE 21	水位、流速、流量、泥沙、水温、盐度、氮、磷、硅、生化需氧量、底泥需氧量、溶解氧、藻类、细菌等，允许自定义变量	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	平面二维	小时及以下	河流、湖库、河口、近海、海洋等	[18-20]
地表水体	Delft3D	水位、流速、流量、泥沙、水温、盐度、氮、磷、硅、生化需氧量、底泥需氧量、溶解氧、藻类、细菌、重金属有机微污染物等，允许自定义变量	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	三维及以下	小时及以下	河流、湖库、河口、近海等	[15,21,22]
地表水体	Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)	水位、流速、流量、泥沙、水温、盐度、氮、磷、硅、化学需氧量、溶解氧、藻类、活性金属等，允许自定义变量	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	三维及以下	小时及以下	河流、湖库、河口、近海等	[15,23-25]
地表水体	Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)	水位、流速、流量、泥沙、水温、盐度、氮、磷、硅、生化需氧量、底泥需氧量、溶解氧、藻类、细菌等，允许自定义变量	水下地形、气象、污水排放量和取水量、污染负荷、水文、水质等	三维及以下	小时及以下	河流、湖库、河口、近海等	[3,15,16,26-28]

## 附录 D

(资料性)

## 流域水环境模型模拟效果评价指标及其精度参考值

表 D.1 以月值数据为例提出了流域水环境模型模拟效果典型评价指标及其精度参考值。

表 D.1 流域水环境模型模拟效果评价指标及其精度参考值

评价指标	模拟变量	优	良	中	差
纳什效率系数	通用 (月值数据)	[0.75, 1]	[0.65, 0.75]	[0.5, 0.65]	(-∞, 0.5)
百分比偏差	流量 (月值数据)	[-10%, 10%]	[-15%, -10%] 或(10%, 15%]	[-25%, -15%] 或(15%, 25%]	[-100%, -25%] 或(25%, +∞)
	沉积物 (月值数据)	[-15%, 15%]	[-35%, -15%] 或(15%, 35%]	[-55%, -35%] 或(35%, 55%]	[-100%, -55%] 或(55%, +∞)
	水质 (月值数据)	[-25%, 25%]	[-40%, -25%] 或(25%, 40%]	[-70%, -40%] 或(40%, 70%]	[-100%, -70%] 或(70%, +∞)
均方根误差与观测值标准偏差比	通用 (月值数据)	[0, 50%]	(50%, 60%]	(60%, 70%]	(70%, +∞)
决定系数	通用 (月值数据)	[0.8, 1]	[0.65, 0.8)	[0.5, 0.65)	[0, 0.5)

其中, 纳什效率系数、百分比偏差、均方根误差与观测值标准偏差比、决定系数等指标的定义如下。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \quad (D.1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \times 100\% \quad (D.2)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}} \times 100\% \quad (D.3)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})(Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}} \right]^2 \quad (D.4)$$

式中:

NSE——纳什效率系数;

PBIAS——百分比误差;

RSR——均方根误差与观测值标准偏差比;

R<sup>2</sup>——决定系数;Y<sub>i</sub><sup>sim</sup>——第 i 个数据点的模拟值;Y<sub>i</sub><sup>obs</sup>——第 i 个数据点的观测值; $\bar{Y}^{sim}$ ——所有模拟值的平均值; $\bar{Y}^{obs}$ ——所有观测值的平均值;

n——数据点数量。

附 录 E  
(资料性)  
流域水环境模型评估验证报告提纲

### E.1 管理决策目标分析

描述本报告中管理决策案例所涉流域、区域或水体的生态环境、经济社会等主要特征，面临的主要生态环境问题，管理决策的背景、目标以及使用流域水环境模型的必要性和需求等。

### E.2 模型适用性初步评估

#### E.2.1 候选模型概述

描述候选模型的开发情况、基本功能、国内外应用情况等。

#### E.2.2 适用条件概述

描述候选模型在模拟变量、模拟方式、时间和空间精度、计算效率等方面的适用条件和数据需求，并评估其是否适用于本报告的管理决策案例。

### E.3 模型结构特征评估

#### E.3.1 建模机理

##### E.3.1.1 模型概化

描述模型概化方法和结果，宜与国内外同类模型相比较，说明模型概化的合理性及其与管理决策目标的匹配度。

##### E.3.1.2 模型机理

描述模型机理，宜与国内外同类模型相比较，说明模型机理的科学性。

#### E.3.2 数学表达

##### E.3.2.1 数学表达形式

描述模型数学表达形式，宜与国内外同类模型相比较，说明模型数学表达形式的合理性及其与管理决策目标的匹配度。

##### E.3.2.2 变量和参数定义

描述模型变量和参数的选取方法、含义等，宜与国内外同类模型相比较，说明模型变量和参数定义的合理性及其与管理决策目标的匹配度。

#### E.3.3 求解算法

##### E.3.3.1 算法设计

描述模型采用的求解算法，提供算法稳定性、收敛性等测试结果，宜与国内外同类模型相比较，说明模型算法设计的合理性。

##### E.3.3.2 算法精度

提供算法在不同计算条件设置下的测试结果，评估其是否符合管理决策目标对时间和空间精度、误差水平、计算效率等的要求，宜与国内外同类模型相比较，说明模型算法精度的有效性。

### E.4 模型数据质量评估

#### E.4.1 数据完备性

##### E.4.1.1 数据可获得性

分析模型所需的输入、变量、参数等的获取方式和来源。

#### E. 4. 1. 2 数据代表性

分析模型所需的输入、变量、参数等在模拟对象主要组成（如污染源、水体）、属性特征（如不同水质指标）、系统过程（如迁移转化）以及时间（如不同水文年型）和空间（如不同监测点位）等方面的代表性。

#### E. 4. 2 数据质量

##### E. 4. 2. 1 数据规范性

分析模型所需的输入、变量、参数等来源的规范性。对于自行调查和监测获取的数据，详细描述各项数据获取的技术方法，并对照国家相关主管部门制定的技术标准评价其规范性。对于采用标准方法获取数据但数据质量保证和质量控制措施不齐全，采用非标准方法获取数据，以及通过国家或地方相关主管部门或权威机构之外的其他途径获取数据等情形，应提供数据准确度、精密度、误差等评价结果。

##### E. 4. 2. 2 数据匹配性

分析模型所需的输入、变量、参数等在观测或统计的时刻、点位、时间长度、空间范围、时间和空间分辨率等方面的匹配性。

#### E. 4. 3 定解条件

##### E. 4. 3. 1 边界条件

描述模型定解边界条件的设定方法和数据来源，宜与国内外同类模型相比较，说明模型定解边界条件设定的合理性。

##### E. 4. 3. 2 初始条件

描述模型定解初始条件的设定方法和数据来源，宜与国内外同类模型相比较，说明模型定解初始条件设定的合理性。

#### E. 4. 4 缺失数据

描述模型所需数据的缺失情况及其处理方式。

#### E. 5 模型模拟性能评估

##### E. 5. 1 模型参数

###### E. 5. 1. 1 参数率定方法

描述模型的参数率定方法以及评价指标等技术参数设置，宜与国内外同类模型相比较，说明模型参数率定方法的合理性。若采取其他有助于参数率定的技术，亦需要详细描述。

###### E. 5. 1. 2 参数灵敏度

描述模型参数灵敏度分析方法和结果，宜与国内外同类模型相比较，说明模型参数灵敏度结果的合理性。宜利用参数率定结果和灵敏度分析结果，进一步分析模型结构的合理性和模拟结果的可靠性。

###### E. 5. 1. 3 参数率定结果

描述模型参数率定的结果，并与参数的现场观测值或实验室测定值、相同模型在同一流域或类似流域的参数取值、类似模型的参数取值等可比数据进行比较，说明模型参数率定结果的合理性。

##### E. 5. 2 模拟效果

描述模型参数率定和参数验证两个阶段的观测数据分配方式和模型模拟效果，宜与国内外同类模型相比较，说明模型模拟的精度水平。若开展多模型评价，还需提供候选模型与其他模型模拟效果的对比

比分析结果。

### E.5.3 模型不确定性

#### E.5.3.1 模型输入和参数不确定性

描述模型输入和参数不确定性的表征方式和结果，宜与国内外同类模型相比较，说明模型输入和参数不确定性表征方式的合理性。当模型所需数据有缺失时，应说明缺失（替代）数据不确定性的表征方式和结果。

#### E.5.3.2 模拟结果不确定性

描述模型模拟结果不确定性分析的方法和结果，评估模拟结果不确定性对管理决策的影响及风险，提出降低模拟结果不确定性和管理决策风险的措施。当模型所需数据有缺失时，应评估缺失（替代）数据对模拟结果不确定性的影响。

## E.6 模型决策功能评估

### E.6.1 决策实用性

#### E.6.1.1 计算效率

描述模型模拟时段长度与模型运算时间的数量关系，说明模型计算效率与管理决策目标的匹配度。

#### E.6.1.2 数据条件

描述在正常业务状态下模型所需各项数据的可获得性，并明确各项数据的更新频率要求。

#### E.6.1.3 软硬件条件

描述在正常业务状态下模型所需的计算机软件和硬件、技术人员、运行维护经费等的可获得性。

### E.6.2 应用便利性

#### E.6.2.1 操作便利程度

描述模型设计、功能等方面的操作便利程度。

#### E.6.2.2 技术服务支撑

描述在正常业务状态下可提供的模型技术文档、客户服务等方面的技术服务支撑。

#### E.6.2.3 模型可扩展性

描述模型设计、功能、代码等方面的可扩展性。

## E.7 模型评估验证结论

综合上述内容，说明候选模型的优缺点，并明确给出模型是否适用于管理决策目标的结论。

## E.8 模型应用技术要求和建议

针对模型评估验证过程中存在的问题，对模型业务化运行提出技术要求和建议，包括数据采集与数据质量、参数率定和取值、模拟结果不确定性分析等。

### 参 考 文 献

- [1] Bingner R L, Theurer F D, Yuan Y, Taguas E V. 2018. AnnAGNPS technical processes documentation (Version 5.5). Oxford: National Sedimentation Laboratory.
- [2] Borah D K, Ahmadisharaf E, Padmanabhan G, Imen S, Mohamoud Y M. 2019. Watershed models for development and implementation of Total Maximum Daily Loads. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(1): 03118001.
- [3] 李本纲, 陶澍, 曹军. 2002. 水环境模型与水环境模型库管理. *水科学进展*, 13(1): 14-20.
- [4] U. S. Environmental Protection Agency. 2007. BASINS Technical Note 3 WinHSPF simulation module matrix. EPA-823-R-99-003. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency.
- [5] Tetra Tech, County of Los Angeles, U. S. Environmental Protection Agency. 2012. Loading Simulation Program in C++ (LSPC) Version 3.1 user's manual. Alhambra: County of Los Angeles.
- [6] U. S. Environmental Protection Agency. 2019. BASINS 4.5 (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) modeling framework. Research Triangle Park: National Exposure Research Laboratory.
- [7] Moriasi D N, Wilson B N, Douglas-Mankin K R, Arnold J G, Gowda P H. 2012. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4): 1241-1247.
- [8] DHI. 2020. MIKE SHE, User guide and reference manual. H, Gowda P H. 2[9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. 2011. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation (Version 2009). College Station: Texas Water Resources Institute.
- [10] Rossman L A. 2015. Storm Water Management Model user011. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation (Version 2009). College Statio[11] Zhao R. 1992. The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology*, 135(1-4): 371-381.
- [12] 刘金涛, 宋慧卿, 张行南, 陈喜. 2014. 新安江模型理论研究的进展与探讨. *水文*, 34(1): 1-6.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 2019. HJ 2.3-2018 环境影响评价技术导则 地表水环境. 北京: 中国环境出版社.
- [14] Chapra S C, Pelletier G J, Tao H. 2012. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality (Version 2.12), Documentation and users manual. Medford: Tufts University.
- [15] 周刚, 熊勇峰, 呼婷婷, 白静, 陈振宇. 2020. 地表水水质模型综合评价技术体系研究. *环境科学研究*, 33(11): 2561-2570.
- [16] Kannel P R, Kanel S R, Lee S, Lee Y-S, Gan T Y. 2011. A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams. *Environmental Modeling & Assessment*, 16: 183-204.
- [17] DHI. 2020. MIKE HYDRO, River, User guide. HT Y. 2011. A R[18] DHI. 2020. MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic module, User guide. Hørsholm: DHI.

- [19] DHI. 2020. MIKE 21 Flow Model, Advection/dispersion module, User guide. H DHI.n Water Q[20] DHI. 2020. MIKE 21 Flow Model, MIKE ECO Lab module, User guide. Hguide. H DHI.n[21] Deltares. 2020. Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments (Version 3.15), User manual. Delft: Deltares.
- [22] Deltares. 2021. D-Water Quality: Versatile water quality modelling in Delta Shell (Version 1.1), User manual. Delft: Deltares.
- [23] Tetra Tech. 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation. Volume 1: Hydrodynamics and mass transport. Fairfax: Tetra Tech.
- [24] Tetra Tech. 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation. Volume 2: Sediment and contaminant transport and fate. Fairfax: Tetra Tech.
- [25] Tetra Tech. 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation. Volume 3: Water quality module. Fairfax: Tetra Tech.
- [26] Ambrose R B, Wool T A. 2017. WASP8 stream transport - Model theory and user's guide. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- [27] Martin J L, Ambrose R B, Wool T A. 2017. WASP8 macro algae - Model theory and use. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. rfax: Te[28] Wool T A, Ambrose R B, Martin J L. 2017. WASP8 multiple algae - Model theory and user's guide. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
-