

DB61

陕西省地方标准

DB 61/ XXXXX—XXXX

流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南

Guidelines for watershed-scale groundwater simulation and prediction techniques

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

陕西省市场监督管理局 发布

目 次

目 次 I

前 言 I

1 范围 2

2 规范性引用文件 2

3 术语和定义 2

4 总则 3

5 模拟目标与范围确定 4

6 资料收集与野外调查 4

7 水文地质概念模型概化 6

8 地下水流数值模型建立 6

9 模型校准、验证与不确定性分析 10

10 情景设置与模拟预测 11

11 成果编制与提交 13

附 录 A （资料性） 报告的参考格式 15

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。

本文件由陕西省水利厅提出并归口。

本文件起草单位：长安大学、中国地质调查局西安地质调查中心、中国地质调查局南京地质调查中心，陕西省渭河生态区保护中心。

本文件主要起草人：王文科、王周锋、李佩、王兵、张俊、李婉歆、李洁、侯昕悦、王雪平、王锦璇、李瑛、樊泽、宋赅、魏玮、郭婷、王凡、周雅婕、杜雅珍。

本文件首次发布。

本文件由长安大学负责解释。

联系信息如下：

单位：长安大学

电话：029-82339281

地址：陕西省西安市雁塔区雁塔路 126 号

邮编：710054

流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南

1 范围

本文件确立了流域尺度地下水流数值仿真模拟与预测的总体原则、工作程序，提供了模型构建、率定验证、预测情景设计及成果报告编制等方面的指南。

本文件适用于自然环境演变与人类活动驱动下，流域尺度水循环过程、地下水系统演化及气候变化响应的数值仿真模拟与预测、以及水资源可持续利用与管理决策的评估支撑。

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 14157-2023 水文地质术语
GB/T 14497-1993 地下水资源管理模型工作要求
GB/T 30943-2014 水资源术语
GB/T 50625-2023 机井工程技术标准
GB/T 51040-2023 地下水监测工程技术标准
DZ/T 0270-2014 地下水监测井建设规范
DZ/T 0282-2015 水文地质调查规范（1:50000）
DZ/T 0420-2022 地下水采样技术规程
DZ/T 0469-2024 地下水资源调查评价规范
DZ/T 0470-2024 地下水统测技术要求
SL 196-2015 水文调查规范
SL/T 238-2025 水资源评价导则

3 术语和定义

GB/T 14157、GB/T 30943和GB/T 51040界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

流域尺度地下水系统 Watershed-scale groundwater system

具有完整或相对独立的水文地质边界，在地表水分水岭或区域隔水边界控制下，拥有统一的地下水补给、径流、排泄过程及水力联系的地下水整体。

3.2

地下水系统驱动因子 Driving factor of groundwater system

在流域尺度内，对地下水补给、径流、排泄过程、水平衡关系以及空间分异与时间变异特征具有显著调控、扰动或解释效应的自然要素与人类活动因素。

3.3

地下水模拟预测情景 Groundwater simulation prediction scenario

以预测或管控目标为导向，综合考虑未来气候变化、人类活动、水资源利用、生态环境保护和经济

社会发展等单一或多因子交互影响，设定并用于输入地下水数值模型的边界条件与源汇项组合方案。

4 总则

4.1 基本原则

4.1.1 流域尺度地下水仿真模拟与预测应服务于国家和地方的水资源最严格管理（三条红线）、地下水超采治理、生态水位保障、地质灾害防治等核心需求。

4.1.2 应充分考虑流域内“降水-地表水-土壤水-地下水”的联合转化关系，统筹兼顾上中下游、左右岸、多含水层之间的水力联系。

4.1.3 概念模型的建立应依据扎实的野外勘查资料与多源监测数据，数学模型的选择应能准确刻画流域内复杂的地下水动力学过程。

4.1.4 数值模型校正和验证时，模拟的水动力场（尤其是地下水位分布）及水均衡应符合实际水文地质条件。

4.1.5 应根据流域的渗流特征选取相应的数学模型和模拟方法。

4.1.6 预测模型应具备科学性、实用性和前瞻性，既能再现历史水文地质演变规律，又能预测不同气候变化情景与人类活动影响下地下水系统的响应趋势。

4.2 工作程序

4.2.1 流域尺度地下水仿真模拟及预测技术的工作流程参见图1。

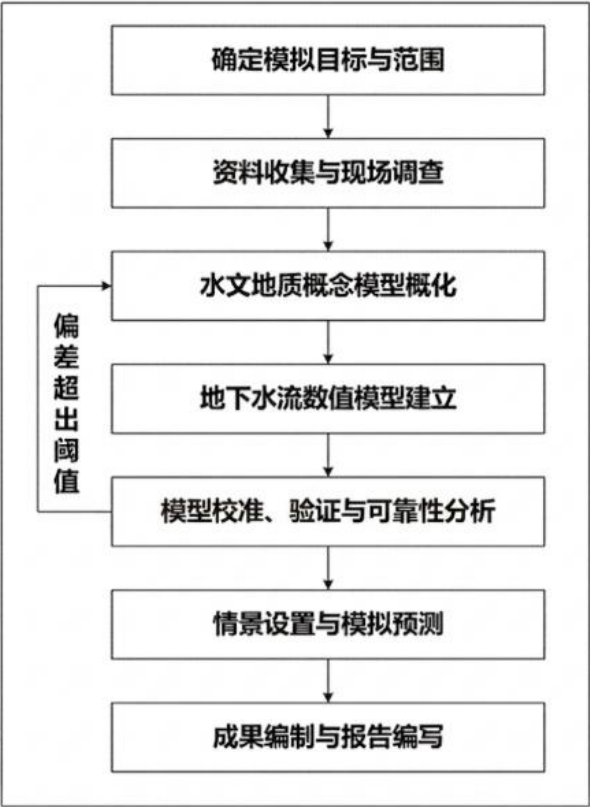


图1 流域尺度地下水仿真模拟与预测工作流程图

5 模拟目标与范围确定

5.1 模拟目标的分类与确定

5.1.1 模拟目标的确定应依据流域地方社会经济发展规划、环境保护规划及水资源综合规划，明确模型的主要功能属性。

5.1.2 模拟目标按应用场景应分为以下 3 类：

- a) 以评价地下水允许开采量、地下水动态演变趋势、超采区治理效果等为目标的管理型；
- b) 以维持流域地下水生态功能、控制地下水生态临界水位、防止流域基流断流为目标的生态保护型；
- c) 以预测因地下水开采引起的地面沉降或局部塌陷为目标的地质环境防灾型。

5.2 模拟范围的划定

5.2.1 模拟范围应为流域尺度内具有统一地下水流场和水力联系的平原区连续含水层。若涉及非连续山区，应明确其与平原区的水力联系及边界条件。

5.2.2 根据区域水文地质特征确定模拟单元：

- a) 陕南地区和关中地区仿真模拟单元宜细化至长江和黄河三级及以下支流的平原区；
- b) 陕北地区模拟单元应细化至黄河二级及以下支流流域。其中，黄土丘陵沟壑区以河谷区地下水系统为单元时，宜按流域整体进行模拟；风沙滩地宜建立全流域模型。

5.2.3 应根据勘察深度，明确模型顶界、底界及内部各个含水层的垂直泛化范围。模拟深度宜控制在 300 m 以浅；当深部含水层影响地表生态且数据资料满足模拟条件时，可扩展至 300 m 以深。

5.2.4 模拟区上边界宜设为地下水潜水面；具备条件时，上边界可延伸至地表，建立饱和-非饱和数值模型。模型底界应延伸至具有区域控制意义的相对隔水层。

6 资料收集与野外调查

6.1 比例尺要求

6.1.1 调查比例尺不宜小于 1:50,000，重点地段不宜小于 1:10,000。对于中型流域或资料不能满足数值模型建模要求的流域，可采用 1:100,000 或 1:200,000~1:250,000 的比例尺。

6.2 资料收集的内容

6.2.1 地理空间与地形资料包括：数字高程模型（DEM）、土地利用/覆被类型图（LUCC）、行政区划、流域边界等。

6.2.2 基础地质与水文地质资料包括：区域地质图、水文地质图、地质剖面图、钻孔柱状图、地球物理勘探与抽水试验报告、地下水长观孔的水位动态监测数据等。

6.2.3 气象与水文资料包括：长系列逐日或逐月降水量、蒸发量、气温等气象数据；河流、湖泊、水库的分布及水位、流速、流量等历史监测资料；横纵断面比降、河流径流特征量、河流洪峰流量与河流基流量等。必要时应实测主干河流的河床结构。

6.2.4 人类活动与社会经济资料包括：灌区分布、灌溉定额及灌溉回渗系数；工业、农业、生活地下水开采量的历年数据与主要水源地分布；人工回灌、压采方案及其实地记录等。

6.3 野外调查与补充勘查

6.3.1 当收集到的历史资料在空间分布上存在盲区、时间序列断档或关键水文地质参数缺失时，应开展针对性的野外调查与补充勘查。

6.3.2 野外调查与补充勘查的核心内容应包括以下：

- a) 地质地貌：调查地形地貌、地质构造、地层岩性、地表水体及地下水出露点等；
- b) 含水层结构：调查含水层厚度与顶底板埋深、岩性分层、隔水层分布、层间水力联系及边界类型；
- c) 地下水流场空间特征：调查地下水的水位、流向、水力梯度以及分水岭、汇水区的空间分布与动态；
- d) 地下水源汇项调查：调查模拟区内的降水入渗、地表水体交互、侧向径流等天然源汇项，以及人类活动引起的开采排泄、渠道渗漏、人工回灌等人工源汇项；
- f) 监测网布设现状评估：调查现有地下水监测孔（井）的空间覆盖度、层位代表性及长序列数据的连续性。

6.3.3 野外调查与补充勘查的技术方法应符合以下要求：

- a) 水文地质测绘：应采用遥感解译、无人机航测与地面路线调查相结合的方法。测绘比例尺应符合6.1的规定；
- b) 地球物理勘探：对空间结构存在存疑的区域或资料严重匮乏的盲区，应采用物探手段进行探查与空间边界约束；
- c) 水文地质钻探：应在物探解译的关键节点及概念模型控制薄弱区布设勘探孔或参数孔。
- e) 地下水流场统测与调查：应在枯水期或丰水期开展大面积的地下水水位、水质统测。统测点密度应满足地下水流向和水力梯度刻画的需求；
- f) 监测网优化布设：应根据流场调查与源汇项核查结果，在地下水强径流带、水力梯度陡变带、重要边界条件控制段以及开采漏斗区，优化调配或增设长期监测孔。

6.4 关键水文地质参数的获取

6.4.1 主要含水层的水文地质参数应优先通过现场抽水试验计算获取。对于大面积无法开展抽水试验的区域，宜根据地下水动态观测数据进行参数反演与调校，并应对比邻近类似水文地质单元的试验成果进行合理性验证。

6.4.2 对数值模拟涉及包气带水分运移问题，宜通过野外原位双环入渗试验或包气带张力计监测系统，获取非饱和土壤水分特征曲线及相关参数。

6.5 数据可靠性审核与标准化处理

6.5.1 所有收集到的空间几何数据、点源坐标，必须统一转换至国家法定的地理坐标系和投影坐标系。不同来源的气象、水文、开采数据，应采用插值或累加方式统一至模型设定的基本应力期；应使用算术平均法、泰森多边形法、等值线法等方法将站点资料整理为流域尺度资料。

6.5.2 在资料录入模型前，需进行区域性的初步水均衡概算。对比源汇项与水位实际变化是否匹配。发现矛盾数据时，应查明原因，必要时予以剔除或进行现场复测。

7 水文地质概念模型概化

7.1 含水层结构与介质概化

7.1.1 应依据地质剖面、钻孔资料、地球物理探测资料、水位监测及水力参数的空间分布，分析地层岩性岩相与地质构造，明确含水层空间分布特征，在条件允许的情况下优先采用三维地质结构建模技术构建水文地质概念模型。

7.1.2 含水层结构的确定应结合区域特征实施分类概化：

- a) 陕南地区和关中地区：以第四系松散层孔隙含水层结构为主；
- b) 陕北地区：以第四系松散层孔隙含水层、白垩系碎屑岩裂隙-孔隙含水层、石炭系至侏罗系风化裂隙含水层为主，以及寒武系至奥陶系岩溶含水层结构为主。

7.1.3 在分析裂隙或岩溶地质发育特征的基础上，对于含水层各向异性不明显的地区，应采用等效多孔介质方法建立水文地质概念模型；对于各向异性明显的地区，应采用离散裂隙模型或双重介质模型。

7.2 边界条件概化

7.2.1 边界条件分为以下三类：

- a) 第一类边界（定水头边界/Dirichlet）：适用于边界上水头主要受外界控制、不受区内流场变化影响的部位，如与含水层有直接水力联系的地表水体（河流、湖泊）、泉的出露点等。
- b) 第二类边界（定通量边界/Neumann）：适用于隔水边界（法向流量为零）、地下水分水岭、抽水井边界等。
- c) 第三类边界（混合边界/Cauchy）：适用于河床有弱透水层沉积的地表水体边界（渗漏性河流）、弱透水断层带等，入渗和蒸发等垂向边界条件也可用第三类边界描述。

7.3 水流系统概化

7.3.1 应根据模拟区地下水渗流特征的时空分布，明确地下水流动状态。概化后的水流系统结构应明确说明其与原始水文地质格局的对应关系，确保模型具有地质合理性与技术可追溯性。

7.3.2 应识别并概化模拟区地下水流场特征，明确流线分布、分水与汇水边界、含水层间的水力连通通道、断层阻水带及弱渗透带，完成主要水文地质单元的空间异质性划分。概化过程中应保留控制流场格局的关键水文地质特征（如断层控水、裂隙导水带、层间渗漏带、地形冲刷线等），对整体流场影响较小的次要特征可予以简化。

8 地下水流数值模型建立

8.1 控制方程

8.1.1 一般情况下，地下水数值模拟宜采用三维非稳定流模型。对于非均质各向异性含水层，其三维非稳定流控制方程见公式（1）：

$$\begin{cases}
\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W' = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in D, t \geq 0 \\
H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in D \\
K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial H}{\partial z} (K_z + p) + p = S_y \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Gamma_0, t \geq 0 \\
H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\
K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = v(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \\
K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \sigma(H_r - H) & (x, y, z) \in \Gamma_3, t \geq 0
\end{cases} \quad (1)$$

式中：

D 为渗流计算域；

H 为总水头， m ；

(x, y, z) 为节点坐标；

K_x 和 K_y 为水平渗透系数， m/d ；

K_z 为垂向渗透系数， m/d ；

W' 为含水层内部的源汇项， $1/d$ ；

t 为时间， d ；

p 为潜水面上的垂向水量交换， m/d ；

S_s 为储水率， $1/m$ ；

S_y 为给水度，无量纲；

H_0 为初始水头， m ；

H_1 表示边界上的已知水头， m ；

v 表示流入第二类边界的渗流速度， m/d ；

σ 为弱透水层的渗透系数与宽度之比， $1/d$ ；

H_r 为第三类边界外侧水头， m ；

Γ_0 为渗流计算域的上边界（潜水面）；

Γ_1 为第一类边界，

Γ_2 为第二类边界，

Γ_3 为第三类边界；

n 为边界的外法线方向。

8.1.2 当含水层较薄且垂向流速较小可忽略不计，或地下水位变化幅度小于含水层厚度的 20% 时，可近似采用平面二维非稳定流模型，其地下水流控制方程见公式（2）：

$$\begin{cases}
\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y) \in D \\
H(x, y, t)|_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in D \\
H(x, t)|_{\Gamma_i} = H(x, y) & (x, y) \in \Gamma_i, i=1,2 \\
K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_j} = q(x, y) & (x, y) \in \Gamma_j, j=3,4
\end{cases} \quad (2)$$

式中：

D 为渗流计算域；

H 为总水头，m；

(x, y) 为节点坐标；

K_x 为水平渗透系数，m/d；

K_y 为垂向渗透系数，m/d；

Γ_1 和 Γ_2 为第一类边界；

Γ_3 和 Γ_4 为第二类边界；

n 为 Γ_3 和 Γ_4 的法向方向；

W 为源汇项， $L^2/T \cdot L^2$ ；

u 为潜水含水层给水度。

8.2 数值方法选择

8.2.1 地下水数值模拟应根据模拟目标、空间异质性特征、计算效率及收敛性要求，合理选择数值计算方法与相应的模拟软件。

8.2.2 常用的数值方法包括有限差分法（FDM）、有限元法（FEM）和有限体积法（FVM）等，可根据模拟区的地质结构复杂程度、数据支撑能力、计算效率及业务需求等条件选择适宜的数值方法。

8.3 数值模型空间离散化

8.3.1 模型网格类型的选取应与所采用的数值方法相匹配。

8.3.2 水平网格离散应采用变网格密度设计。地下水水源地、集中开采区、地表水交互剧烈区、陡峭的水力梯度带等重点控制区域，应进行网格加密；模型外围边界、地下水径流微弱或含水层均匀分布的非重点区域，网格尺寸可调整放大。

8.3.3 垂向离散层数应依据水文地质概念模型的含水层组划分确定，数值层应与实际含水层或弱透水层一致。层厚应根据各含水层的地质埋深与实际厚度进行插值控制。

8.4 边界条件的空间离散化与赋值

8.4.1 边界条件离散化与赋值应保持物理合理性，与地下水系统实际状态相符。依据野外观测和地质资料确定边界类型和参数，宜减少人为虚拟边界的使用。

8.4.2 隔水边界空间离散化可采用虚拟节点法或直接将边界节点流量置零。在数值模型中，应将对应单元设置为零流量边界。实际条件下，弱透水层可处理为隔水边界。边界位置和类型应基于地质资料确定。

8.4.3 第一类边界空间离散化通过节点控制法，将边界节点水头指定为已知值，该节点不参与方程求解。随时间变化的水头，应构建时间序列函数分段赋值。

8.4.4 第二类边界空间离散化时，将边界节点流量作为源/汇项附加到控制体积上，整条边界总流量应按节点平均分配。随时间变化的边界流量可分段赋值。

8.4.5 第三类边界交换流量与边界内外水头差成线性关系，适用于弱透水河床、排水沟、泉水等边界。空间离散化可引入传导系数，传导系数由渗透系数、交换面积和厚度决定。

8.5 汇源项概化与处理

8.5.1 应全面识别模拟区地下水系统的补给项与排泄项，明确其空间分布特征与时间演变规律，并进行定量计算。

8.5.2 垂向气象与植被驱动项的量化应符合以下要求：

a) 降水入渗补给量：应根据土地利用类型、包气带结构与岩性、降水强度等因素进行降水入渗补给分区，采用入渗系数法计算。入渗系数应通过野外原位入渗试验、地下水水位动态分析法或动态水均衡法综合确定；

b) 潜水蒸发与植被蒸散发排泄量：应根据潜水埋深、大气蒸发能力、植被覆盖特征，采用阿维里扬诺夫公式等经验公式、半经验公式，或耦合动态土壤-植被-地下水模型进行定量计算。

8.5.3 地表水体交互项的量化应符合以下要求：应根据地表水与地下水的水力联系，量化河流、湖泊、水库、渠道与地下水的水量交换。当两者的水位相差较大且存在独立渗漏通道时，可采用渗漏系数法计算交互量；当水位相差较小或直接连通时，应根据地表水与地下水的水头差、接触长度及河床渗透特性计算交互量，或通过河道断面流量差值法进行校验。

8.5.4 侧向边界径流项的量化应符合以下要求：应依据侧向边界内外的地下水水头差、边界几何长度及含水层导水系数，采用达西定律计算侧向径流补给量或排泄量。

8.5.5 人类活动干预项的量化应符合以下要求：

a) 地下水开采排泄量：应全面统计工业、农业及生活开采量。集中开采区或大型单井应获取单井实际开采量与开采层位资料；分散农业开采区应根据机井分布密度、农业灌溉定额与机井耗电量等综合测算总开采量；

b) 农田与渠系灌溉回归补给量：应根据灌溉定额、灌溉面积、渠系输水损失及灌溉回归系数计算；

c) 人工回灌补给量：应根据回灌井（池）的设计流量或实际运行记录确定。

8.6 源汇项输入

8.6.1 面状源汇项的空间输入应符合以下要求：

a) 降水入渗补给：应将各分区的入渗补给强度映射至对应的顶层网格单元；

b) 潜水蒸发排泄：应在潜水含水层网格单元中输入潜在蒸发量、蒸发极限埋深及经验公式参数，由模型根据潜水面埋深动态计算；

c) 地表水体交互：应根据河流、渠道、湖库的线状或面状几何边界，定位对应的含水层网格单元，输入地表水体水位、河床底标高、河床渗透系数等控制参数。

d) 侧向边界径流项：应结合侧向边界的几何特征，将边界径流参数（水头差、导水系数等）输入至对应网格单元，并明确其补给或排泄方式；

e) 地下水开采排泄量：集中开采区或大型单井，应根据井位地理坐标映射至对应网格单元，明确开采层位并输入实际开采量时序数据；分散农业开采区，应将测算的总开采量按面积比例或权重分配，转化为面状开采强度输入；

f) 农田与渠系灌溉回归补给量：应结合灌溉区域的空间分布，按面积比例或权重分配转化为面状补给强度，并关联灌溉时段序列输入至对应网格单元；

g) 人工回灌补给量：应根据回灌设施的地理坐标定位至对应网格单元，明确回灌响应层位，并输入实际运行流量时序数据；

8.6.2 所有源汇项输入参数均应根据模拟设定的基本应力期进行时序离散或平均化处理，确保时间序列的连续性与完整性。

8.7 模型参数赋值

8.7.1 应根据模拟区的水文地质特征与地层岩性异质性，对水力参数（渗透系数、给水度、储水系数等）进行空间参数化设计。可采用空间分区或地质统计学方法描述参数的空间变异性。

8.7.2 参数空间赋值应采用以下方法或其组合：

a) 直接与分区赋值法：参数数据密集且分布均匀的区域，可将实测值直接赋予对应网格单元；对于参数分区明确且区内差异较小的地质单元，可将分区平均值赋予该分区内的所有网格单元；

b) 空间插值法：实测控制点较多但分布不均时，可采用克里金插值、反距离加权插值等方法生成连续参数场，并映射至模型网格单元；

c) 参数相关性与经验赋值法：缺乏实测数据的参数或区域，可根据含水介质的岩性特征，结合行业公认的经验值范围或通过参数相关性公式计算赋值。

8.7.3 参数赋值后应进行合理性检查，检查内容包括：

a) 参数取值是否在对应含水介质合理的物理与经验数值范围内；

b) 参数的空间宏观分布趋势是否与区域沉积相、构造演化等已知地质条件相吻合。

8.8 初始流场校正

8.8.1 非稳定流模拟应确定初始时刻含水层的初始水头分布。

8.8.2 初始流场宜基于钻孔水位、等水位线图等水文地质调查资料经空间插值构建。在开展非稳定流模拟前，应将初始流场导入数值模型进行校正，确保初始水头与模型的控制方程、边界条件及源汇项相容。

8.8.3 校正后的初始流场应符合以下要求：

a) 流场形态与地下水补-径-排条件相协调：初始流场的水头分布所反映的地下水流向、水力梯度及等水头线形态，必须与研究区已知的地下水补给区、径流区、排泄区以及边界性质相匹配，不得出现违反水文地质概念的流动特征。

b) 基于初始流场计算的水均衡量与流场特征相适应：各均衡项应满足水均衡原理，且总均衡量应接近零或与研究区已知的天然均衡状态一致。若出现显著不均衡，需进一步调整直至水均衡收敛合理。

9 模型校准、验证与可靠性分析

9.1 模型校准

9.1.1 模型校准应采用不少于一个完整水文周期的连续观测资料。

9.1.2 模型校准可采用以下方法：

a) 手动调试法：依据模拟区水文地质特征与参数经验值，人工调整参数使模拟值与观测值相匹配。适用于小型模型或参数数量较少的情况，需依赖研究者的经验。

b) 自动校准法：利用数学优化算法进行参数反演估算。采用自动校准法时，应合理设定参数的物理约束边界与目标函数（如模拟水位与实测水位的均方根误差、绝对误差之和）权重，对重点监测区或地下水水源地附近的观测点宜赋予更高权重。

9.1.3 模型参数调优应遵循“先整体后局部、先敏感后非敏感”的程序。应首先调整全局性和高敏感性参数，使整体流场分布趋势与实测值一致；再调整局部异常区参数与低敏感性参数，修正局部偏差。校准过程中应记录每次参数调整的控制幅度与计算结果，形成可追溯的校准日志。

9.2 模型验证

9.2.1 模型验证应选取校准阶段未使用的独立时间段的观测资料进行。验证期资料不应与校准期重复，且验证期内的水文地质参数应采用校准期的确定值，不得随意调整。

9.2.2 输入验证期内实际的边界条件与源汇项数据，运行模型并输出模拟结果。若模型验证不满足本标准规定的技术指标或定性趋势，应返回模型校准阶段，重新分析偏差原因并重新调校。

9.3 可靠性分析

9.3.1 模型可靠性评价应满足以下要求：

- a) 模型确定的水文地质参数应再现水文地质规律，参数分区和数值与地下水分布规律基本一致；
- b) 模拟的地下水流场、水位动态过程以及水量均衡状态，应与模拟区实际的水文地质条件和实测观测数据保持基本一致。

9.3.2 通过水均衡误差和统计指标可对模拟精度量化校核，评价指标和参考标准应符合表 1 的规定。

表 1 模型拟合评价指标及标准

评价指标	常用参考标准
水均衡误差	水量平衡相对误差不应大于±10%。
水位拟合误差	对于降深小的地区（小于 5 m），要求水位拟合小于 0.5 m 的绝对误差结点必须占已知水位结点的 70%以上；对于降深较大的地区（大于 5 m）要求水位拟合小于 10%的相对误差结点必须占已知水位结点的 70%以上。
均方根误差（RMSE）	<0.5 m
相关系数（R ² ）	>0.9
纳什效率系数（NSE）	>0.8

10 情景设置与模拟预测

10.1 预测情景设置

10.1.1 情景设置应满足以下要求：

- a) 情景方案设计应符合区域水文地质条件变化趋势与物理规律。人类活动情景应结合区域发展规划、水资源政策及用水效率指标设定；
- b) 应设置一个“基准情景”作为对照基线。不同情景之间应具备可比性，宜采用多因素交叉的情景矩阵设计；
- c) 预测情景的边界条件应与基准情景保持逻辑一致。初始流场应采用现状流场或基准期末流场。长期预测可采用循环稳态流场作为初始场；
- d) 宜通过多情景设计降低结构性不确定性，通过随机模拟降低由气候、降水天然变异性产生的不确定性；

e) 中长期趋势预测宜采用确定性数值模型结合气候模式降尺度结果进行；极端事件影响评估宜采用耦合水文模型或事件驱动型模拟；

f) 每个情景都应记录其逻辑假设、数值实现方式及关键参数取值。预测输出应包含水均衡项的分项变化。

10.1.2 情景设计类型应包含以下类型：

a) 气候变化情景：设定不同降水年型（丰、平、枯）及未来气候变化条件（降水、温度、蒸发等）的组合，预测气候变化对地下水补给、径流及储量动态的影响，分析极端气候事件对系统稳定性的扰动效应；

b) 水资源开发利用情景：基于现状用水格局和管理需求，设置不同地下水开采与人工回灌方案（如现状开采、优化开采、过量开采、回灌增强等），预测各方案对地下水水位变化、资源可持续性 & 地质环境影响的差异；

c) 生态保护情景：围绕生态水位控制与生态补水策略，分析不同生态调控措施下地下水系统的响应特征，评估地下水位变化对湿地、植被及生态系统健康的影响；

d) 综合管理情景：叠加气候变化与人类活动的综合影响，构建包含多因子交互的复合情景，系统评价政策调控、资源开发与生态保护措施的协同效应。

10.1.3 每类情景宜设置3~5个独立方案。可采用正交设计法或多目标优化方法生成情景组合，并结合敏感性分析筛选典型代表方案。各情景应明确具体模型输入条件的设置方法。

10.2 预测时段

10.2.1 预测时段可分为短期预测、中期预测和长期预测，并应满足以下要求：

a) 短期预测应服务于年度取水总量控制、应急调度和地下水监测预警；

b) 中期预测应支撑区域水资源开发利用规划与环境保护目标评价；

c) 长期预测应重点分析气候变化、土地利用演化及社会经济发展对地下水系统的长期影响与演变趋势。

10.2.2 地下水动态预测的时间步长宜采用月或季度；模型输入参数（如降水、蒸发、取水量等）应基于模拟时间步长同步更新。

10.2.3 应根据历史枯水期和丰水期数据分别预测未来枯水期动态和未来丰水期补给。

10.3 情景分析

10.3.1 情景分析宜从以下多维度进行综合分析：

a) 地下水流场（水头）变化分析：预测期地下水位相比基准期的上升或下降幅度及其空间分布。重点关注漏斗中心、水源地及湿地、泉域等生态敏感区的水位变化极值，并分析水位随时间动态过程，评估逐年下降速率是加速、减缓还是趋于稳定。

b) 水均衡项变化分析：对比降水入渗、河流渗漏、侧向流入等补给项与开采、蒸发、侧向流出等排泄项在不同情景下的增减量。通过计算储变量变化判断地下水系统处于盈余、亏损或平衡状态，并识别主导驱动因子，定量评价开采增加与补给减少对水位下降的贡献比例。

c) 流场形态与补径排条件变化：分析地下水分水岭是否迁移、主流方向是否逆转等流向改变特征，以及水力梯度增大或减小对边界交换量的影响。同时关注排泄方式的转化。

d) 关键环境与工程影响分析：评估地下水变化对依赖地下水的河流、湿地等生态基流的支撑能力。若模型耦合了沉降模块，应分析水位下降与地面沉降量、沉降速率的关系。

e) 不确定性与敏感性分析：量化气候模式、补给系数、开采量预测误差等主要不确定性来源对结果的影响程度。给出不同情景下关键指标的区间范围，并依据模型校准误差和预测时长，对预测结论给出定性的置信等级。

f) 对策与适应性管理建议：依据预测结果提出水位、开采量或泉流量的预警阈值。对比限采、回灌、调水等不同管理情景下关键指标的改善程度，进行措施效果排序。针对预测识别的敏感区，提出增设监测井、加密观测等动态监测建议。

11 成果编制与提交

11.1 一般要求

11.1.1 地下水仿真模拟成果应完整反映模型的建立过程、参数特征、计算结果及验证情况，内容应真实、系统、可复核，并满足流域管理、规划及预测预警的应用需求。

11.1.2 成果编制应按照资料收集、现状分析、方案编制、模型构建、模型校验及成果提炼的完整技术流程进行。

11.1.3 应整理模型输入、运行程序和主要输出文件，配置各项模型输入和输出的文件说明。

11.1.4 成果报告应系统解释和分析模拟流域的地下水流动过程，阐明不同情景下地下水动态变化规律，并提出管理与调控建议。

11.1.5 成果报告格式参照附录A执行。

11.2 数据成果

11.2.1 模型基础数据包括地形地貌、水文地质结构、含水层参数、边界条件、源汇项、地下水位观测数据等。

11.2.2 模型参数数据集包括经率定确定的导水系数、贮水系数、渗透系数、源汇项等参数文件。

11.2.3 模拟计算数据包括水头场、流速场、水均衡量、流量分布等计算结果文件。

11.2.4 预测情景数据包括各情景条件下的输入参数与预测结果文件。

11.2.5 模型文件体系包括模型工程文件、输入/输出数据、脚本及配置说明文档。

11.3 文字与报告成果

11.3.1 成果报告应系统反映地下水仿真模拟与预测全过程，内容完整、逻辑清晰、表达规范。文字报告应包括以下内容：

- a) 项目概况：包括研究目的、范围、基础资料与数据来源；
- b) 研究区概况：包括所研究的流域的相关水文、地质、气象等条件的说明；
- c) 模型建立：包括概念模型、数学模型、求解方法、离散化方法、参数化过程、边界与初始条件设置；
- d) 模型率定与验证：包括率定方法、验证期结果及误差评价；
- e) 模拟结果与分析：包括水位、水量平衡、流场分布、影响因素、敏感性与不确定性分析；
- f) 预测模拟与方案分析：包括情景设定、预测结果及对策建议；
- g) 结论与建议：包括主要成果、适用性说明及后续工作建议；
- h) 附录与数据清单：包括模型文件清单、参数表、图件目录及主要输入/输出数据说明。

11.4 成果提交形式

11.4.1 成果报告须经承担单位初审后，报请主管部门(或委托单位)组织审查验收。

11.4.2 成果应以电子版与纸质版形式提交。

11.4.3 电子版应包括完整的模型文件与数据资料。为满足数字孪生系统的数据交互与共享需求，数字化交付文件应符合GB/T 45405-2025的规定，采用PDV格式提交。

11.4.4 纸质版报告应按照档案管理要求装订成册，图表、曲线与文字内容应对应一致。

附录 A
(资料性)
报告的参考格式

报告的参考格式见图 A.1

流域尺度地下水仿真模拟及预测研究报告

(小二号黑体, 居中, 加粗)

作者: (四号宋体, 居中)

单位: (四号宋体, 居中)

摘要: (请在此填写流域尺度地下水仿真模拟及预测报告的研究背景、研究目的、方法、主要结果和应用价值, 约 200-300 字。字体: 五号宋体, 行间距 1.5 倍, 段落首行缩进 2 字符。)

关键词:

正文: (字体: 小四号宋体, 段落首行缩进 2 字符。)

一、流域水文地质背景

(说明流域地形、地质构造、水文特征及地下水资源条件。)

二、流域水文地质概念模型

(说明含水层类型、补给与排泄机制、地下水流动方向、主要水文单元划分。)

三、流域地下水流模型与求解

(包括数学模型、边界条件、初始条件、流动方程、溶质运移方程及参数分布特征。)

四、模型校正、验证与可靠性分析

(说明模型校正方法、验证过程及可靠性分析。可插入图 3: 模型验证曲线, 表 3: 校正与误差统计指标。)

五、情景设置与模拟预测

(描述不同气候变化、人类活动及综合情景下的模拟方案。可插入表 4: 情景参数表, 图 4: 模拟预测水位变化曲线。)

六、不同情景下地下水补给、径流及排泄优化方案

(分析不同情景下地下水补给、径流、排泄特征, 并提出最优管理与调控方案。)

七、结论

(总结研究成果、技术可行性、应用价值及局限性, 并提出建议。)

附录

(模型参数表、公式推导、观测数据等。附录图表编号为 A1, A2...)

参考文献

(按照 GB/T 7714-2015 标准排列, 编号连续, 字体五号宋体。)

图 A.1 流域尺度地下水仿真模拟及预测研究报告参考格式

DB61/ XXXXX—XXXX
