

# 陕西省地方标准编制说明

标准名称：流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南

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

# 目录

一、工作情况简介 .....	1
二、标准编制原则和标准主要内容 .....	3
三、实证研究 .....	5
四、知识产权说明 .....	29
五、采标情况 .....	29
六、重大意见分歧的处理 .....	30
七、其他应说明的事项 .....	30

# 《流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南》编制说明

## 一、工作情况简介

### （一）编制背景

地下水作为旱区重要的水资源，在保障生活生产供水、支持经济社会发展、维持农业生产和维系良好生态环境中发挥着重要作用。陕西省地处我国西北干旱半干旱内陆区域，地质地貌复杂、气象水文条件特殊，省内水资源禀赋差，具有总量不足、南丰北缺、时空分布极度不均的特征。近年来，受气候变化、国土空间格局调整、农业灌溉、城市生活及能源产业高强度开发等人为因素叠加影响，地下水不合理开发利用问题凸显，省内多处区域出现持续性地下水位下降、地下水降落漏斗发育、局部地面沉降、地下水水质恶化等地质环境问题；同时由于地表水与地下水存在紧密且复杂的水力联系，过量开采地下水引发河道基流衰减、湿地萎缩、天然植被退化，严重破坏流域水生态平衡。例如关中平原农业灌溉长期大规模取用地下水、陕北能源基地集中开采，造成局部地下水采补失衡，严重制约区域高质量可持续发展。目前陕西省主要依靠行政管控手段约束地下水开采，缺少定量化模拟研判技术支撑，亟需依托数值模型精准研判地下水演变规律。

流域尺度的地下水文过程的模拟是当前地表地下水转换和地下水资源评估的主要技术手段。我国地下水数值模拟始于上世纪七十年代，国内外研发的数值模拟工具也已经在不同的空间和时间尺度得以应用。尽管地下水模拟在旱区水资源管理中发挥了重要作用，但针对流域尺度地下水仿真模拟与预测的实际应用，目前从数据来源、参数选取、模型构建到模拟预测方法等方面，尚未形成统一、规范且可落地实施的技术依据。

本指南适配我省流域水资源管控需求，为地下水开采管控、水资源优化配置、超采区综合治理提供技术依据，同时，本指南完善了地下水技术标准体系，可支撑省级地下水监测水网建设，赋能水资源数字化、智能化决策，切实保障区域地下水资源可持续开发利用。

### （二）主要工作过程

2025年6月16日，陕西省市场监督管理局印发了《关于下达2025年第一批陕西省地方标准项目计划的函》，《流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南》被列入陕西省2025年第一批地方标准项目计划之一，项目计划号：SDBXM 009-2025。2025年7月2日，陕西省水利厅办公室印发了《关于做好2025年第一批地方标准水利项目编制工作的通知》，对于本项目的工作流程、时限要求进行了相应规定。长安大学联合中国地质

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和陕西省渭河生态区保护中心，召集专业技术人员成立标准编制组，明确分工、细化工作节点，制定详细编制计划，严格按照地方标准编制管理要求，有序开展本指南的制定工作。

标准具体起草及完善过程如下：

2025 年 8 月，长安大学联合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等单位召开《流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南》研讨会。会议听取了标准编制组关于标准制订的目的背景、主要技术要点等内容的汇报，随后多位参会专家审阅了相关材料，经质询和讨论，确定下一步调研工作安排，并提出贴合地方技术规范、结合陕西省流域实际水文地质条件、明确技术细则、优化调整适用范围等修改建议。

2025 年 10 月 2 日，长安大学联合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等单位召开了《流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南》文档改进会。会议由中国地质调查局西安地质调查中心张俊教授级高工主持，编制单位长安大学王周锋、李佩、李婉歆、侯昕悦等，中国地质调查局南京地质调查中心李洁等技术人员参加了会议，会议对标准框架、技术条款、编制逻辑、内容规范性进行逐条研讨，完善标准主体内容。

现场调研及内部研讨结束后，标准编制组在对调研资料、行业规范、省内实测数据进行深入分析研究的基础上，结合专家意见多次开展内部论证、条款打磨，形成标准征求意见稿初稿。为保证标准科学性、适用性及地方符合性，编制组开展广泛征求意见工作，定向向陕西省水利主管部门、地质环境监测机构、流域管理单位、高校科研院所、水文地质勘察企事业单位等 12 家相关行业单位发放征求意见函。本次征求意见共收集各类修改意见 28 条，剔除重复性、建议性描述意见，筛选形成有效修改意见 16 条，意见涵盖适用范围界定、模型参数选取、模拟流程规范、本地化技术要求等方面。

编制组对全部反馈意见逐条梳理、研判采纳，结合陕西省流域水文地质特征完成条款修改、内容优化，完善标准文本、编制说明及附录资料。依托编制团队十余年陕西本地地下水资料积累、科学理论探索、数值模型模拟及典型流域案例研究成果，经过多轮内部修改、专家校核，最终于 2026 年 5 月形成内容完善、逻辑严谨、符合地方标准编制要求的《流域尺度地下水仿真模拟及预测技术指南(征求意见稿)》，后续将严格按照地方标准流程开展送审、复核及报批工作。

### （三）起草组成员及其所做的主要工作

起草组成员及其所做的主要工作见表 1-1。

表 1-1 标准起草人主要工作

序号	姓名	单位	职务/职称	任务分工
1	王文科	长安大学	教授	负责人/编制人 调研
2	王周锋	长安大学	副教授	编制人 调研
3	李佩	长安大学	副教授	编制人 调研
4	李婉歆	长安大学	讲师	编制人 撰写 调研
5	侯昕悦	长安大学	讲师	编制人 撰写 调研
6	王雪平	长安大学	讲师	资料收集 调研
7	王锦璇	长安大学	副教授	撰写 征求意见
8	樊泽	长安大学	博士研究生	撰写
9	宋赓	长安大学	讲师	修改
10	魏玮	长安大学	副研究员	撰写 征求意见
11	郭婷	长安大学	讲师	撰写 修改
12	王凡	长安大学	博士研究生	资料收集
13	周雅婕	长安大学	博士研究生	撰写
14	杜雅珍	长安大学	博士研究生	撰写
15	王兵	陕西省渭河生态区 保护中心	高级工程师	编制人 征求意见
16	张俊	中国地质调查局西 安地质调查中心	正高级工程师	编制人 撰写 征求意见
17	李瑛	中国地质调查局西 安地质调查中心	正高级工程师	调研 征求意见
18	李洁	中国地质调查局南 京地质调查中心	工程师	编制人 撰写

## 二、标准编制原则和标准主要内容

### 1、编制依据

标准在编制过程中主要依据并引用了下列规范文件：

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

## 2、标准制定原则

本标准的编制依据《中华人民共和国标准法》和《地方标准管理办法》的规定进行编制，标准格式和结构语句依据《标准化工作导则第1部分:标准的结构和编写》(GB/T1.1-2020)进行编排。

①科学性：立足行业实际与技术规律，以理论研究、实践验证、数据支撑为基础，条款设置逻辑严谨、依据充分，符合专业技术原理和发展规律。

②适用性：贴合行业生产、管理、应用实际场景，兼顾现阶段技术水平与落地执行条件，覆盖面广、可落地、易操作，满足不同应用主体使用需求。

③一致性：标准内部术语、定义、指标、句式表述前后统一，章节逻辑、条文层级无冲突，保持内容体系内在连贯一致。

④规范性：严格按照国家标准编制导则的格式、结构、用语要求编写，术语表述、条文体例、编排格式规范统一，符合标准制修订行文规范。

⑤统一性：与现行同类标准、基础通用标准在核心术语、分类划分、基础指标上保持统一，避免概念分歧与指标冲突。

⑥协调性：兼顾上下游相关标准、行业关联规范及现行政策法规要求，横向与相关行业标准协调衔接，纵向与现有层级标准兼容配套，无矛盾冲突。

## 3、标准主要内容

本标准以流域尺度地下水流为研究对象，通过基础地质、气象水文和水文地质资料的系统搜集与整理，建立水文地质概念模型。在此基础上，通过控制方程、初始条件和边界条件建立可计算的模型框架，将地下水系统中复杂的空间结构、介质特性及补、径、排等水文地质过程以数学形式表达，选择合适的数值方法、初始与边界条件和源汇相。通过模型校准、验证与不确定性分析。最终利用建立的模型进行流域尺度地下水流变化的情景预测与分析。在此基础上，总结模型开发与预测研究过程中的科研成果及实践经

验，形成本标准。本标准规定的技术工作主要包括：1、总则；2、确定模拟目标与范围；3、资料收集与现场调查；4、概化和建立模拟区水文地质概念模型；5、建立地下水流数值模型；6、模型校准、验证与不确定性分析；7、情景设置与模拟预测；8、成果编制与提交。

在构建数值模型时，需通过控制方程、初始条件和边界条件建立可计算的模型框架，将地下水系统中复杂的空间结构、介质特性及补、径、排、蒸发等水文地质过程以数学形式表达，为流域尺度的地下水仿真模拟与预测提供科学基础。在流域尺度上，地下水系统通常具有复杂的非均质性和非均匀性。为建立数学模型并实现可解性，一般需作如下假设：（1）含水层为连续介质，可用达西定律描述渗流特性；（2）地下水流为层流，流体为不可压缩或微可压缩；（3）含水层参数（渗透系数、贮水系数等）在空间上可视作分段均质。

本标准中模型的构建过程与使用过程对数据需求、模型建模和模型求解有明确的规定，这是开展模型预测工作的基础，以确保模型结果的稳定性和合理性。

### 三、实证研究

本标准的制定主要依托国家重点研发计划课题、国家自然科学基金项目、陕西省重点研发计划等相关研究成果，并进行了验证。基于多源数据集成的水文地质结构建模技术，选取了关中盆地、秃尾河流域为研究对象，构建地下水文过程数值模型，阐明了变化环境下地下水文过程的历史演变规律与驱动机制；基于未来多情境方案设计与地下水资源演变趋势的预测，提出了地下水合理开发与水资源优化配置的途径与措施。这些成果为标准的制定提供了有利的技术支撑和验证。

#### 3.1 关中盆地地下水仿真模拟及预测

##### 3.1.1 模拟目标与范围

关中盆地位于陕西省中部，东经  $107^{\circ}30'$ ~ $110^{\circ}30'$ ，北纬  $34^{\circ}00'$ ~ $35^{\circ}40'$ 。研究区是一个三面环山，东面敞开的盆地，西起宝鸡，东至潼关，南依秦岭，北靠北山，东西长约 360 km，南北宽窄不等，东部最宽处可达 100 km 以上，面积约  $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海拔高度从西到东渐低，西部约 700-800 m，东部最低处仅 325 m。地形自山区向盆地中心呈阶梯状降落，依次为山前洪积平原、黄土台塬、河谷阶地。渭河自西向东横贯盆地中部，至潼关入黄河。区内自然条件优越，土地肥沃，文化教育事业发达，水资源条件良好，工业城镇密集，区内集中了陕西省 60%以上的人口和 80%的工业，以及 52%的耕地，是

陕西省政治、经济、文化的中心地带，也是我国重要的粮棉产区和国家重点建设的“一线两带”地区。同时关中盆地在我国的交通运输结构中起着承东启西、连接南北的枢纽作用。目前已形成以铁路为骨架，公路为网络，航空运输为补充的主体格局，在我国经济建设中具有重要的区位优势。

本次模拟以关中盆地为目标，针对区域水资源统筹管理不足、工程调蓄能力薄弱、用水技术落后、水污染加剧及水资源开发诱发环境地质问题等突出矛盾，构建流域尺度地下水仿真模型，通过多情景模拟与预测，定量揭示不同开发利用方案下地下水可采资源量的空间分布及上限值，提出环境约束下的生态可采资源量及开采管控方案，为关中盆地地下水资源可持续利用与精准管控提供定量化技术支撑。

3.1.2 资料收集与现场调查

关中盆地地处中纬度地区，属于温带半干旱、半湿润、季风气候。多年平均气温12-13.6℃；降水量530-700mm（图1-1），西部多于东部，南部多于北部；蒸发量1000-1200mm；相对湿度61%-72%，潮湿系数0.6左右，湿度适中。秦岭山前降水量850-1000mm，渭河冲积平原530-600mm，渭北黄土台塬550-750mm。降水量年际与年内分配不均，年内降水量主要集中在七、八、九三个月，其降水量占全年45%左右。关中盆地一年中的降水量多为双峰型，双峰多出现在7月和9月份。

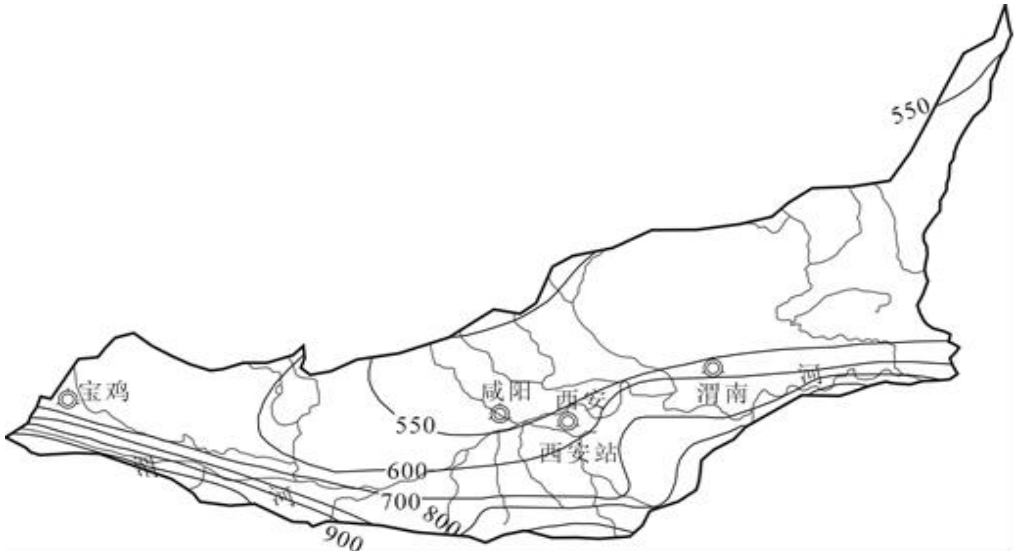
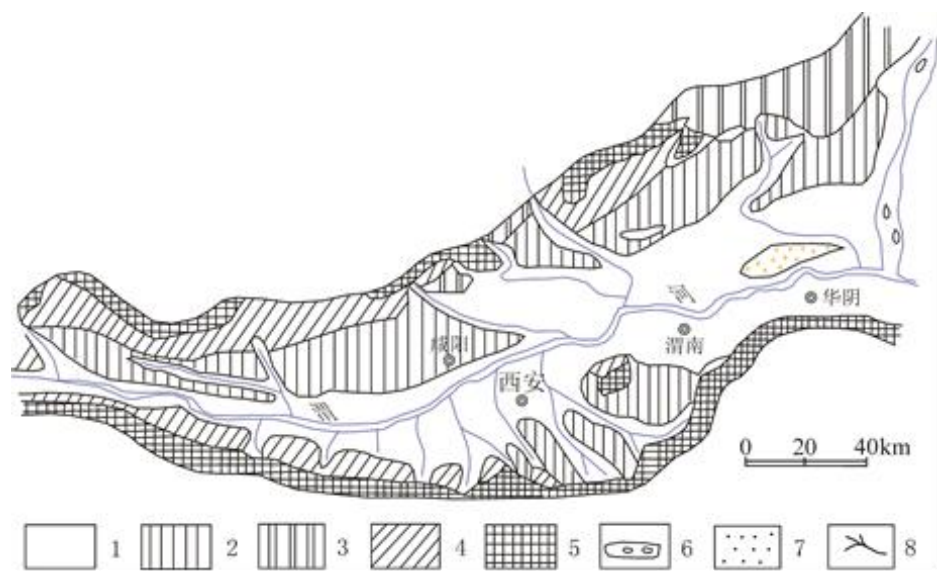


图 1-1 关中盆地多年（1956—2003）降水量等值线图

关中盆地为一新生代断陷盆地。南侧边界紧邻秦岭褶皱带，北侧边界以北山为界，东端受黄河排泄，使地下水与汾河流域切断联系，成为一个独立的水文地质单元。山区与盆地两种构造单元以区域性断裂带为界，自南、北边界向盆地中心构成地堑之阶梯。晚始新世盆地开始凹陷，中新世至上新世继续沉降，堆积了巨厚的第三系河湖相碎屑岩



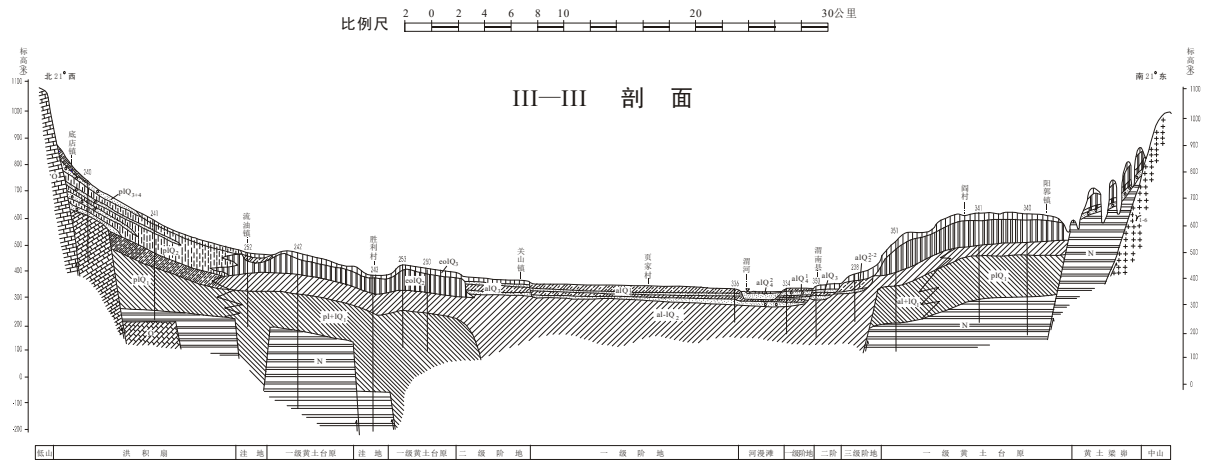
建造。进入第四系后继续沉降，堆积了较厚的第四系松散堆积物，厚度达七八百米，下为第三系。受地质构造控制，从南北山前到盆地中心，呈阶梯状依次分布有山前洪积扇、黄土台塬、冲积平原等地貌类型(图 1-2)。在渭河和洛河之间的阶地上，还分布有一狭长沙丘地形。具体可分河谷阶地、黄土台塬、洪积平原和沙丘四个地貌单元。



1.渭河冲积平原；2、3.一、二级黄土台塬；4.山前倾斜平原；5.山区；6.沼泽地；7.沙丘；8.河流

图 1-2 关中盆地地貌图

在黄土台塬、河流冲积平原潜水含水层下部，广泛分布着承压水，含水层由中、下更新统冲积、洪积、湖积砂、砾卵石组成。在 300m 深度内，承压含水层厚度 20-170m，含水层顶板埋深因地而异，水位埋深各地不同，冲积平原承压水位一般在地面下 5—20m，秦岭山前洪积扇前缘承压水水头高出地面 2—20m；黄土台塬区承压含水层大致埋深 80—250m，承压水位埋深 50—110m；洪积平原承压含水层大致埋深 50—110m，承压水位埋深 10—80m。水文地质剖面图如图 1-3 所示。



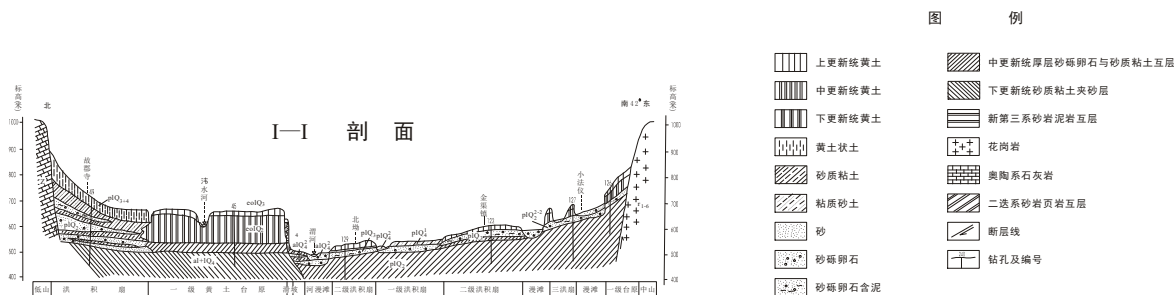


图 1-3 关中盆地水文地质结构图

关中盆地地下水资源较丰富，地下水位埋藏浅，易蓄易采，经济合理。因此，自古以来地下水一直是区内生活和工农业重要的供水水源，主要以城市集中开采方式和农村分散间歇式开采方式开采埋藏 300m 以内的浅层地下水。据统计，自 20 世纪 70 年代以来，随着工农业发展和人口增加，区内各地市地下水开采量呈增长趋势，至 2001 年全区地下水开采量已达到  $36.89 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，开采程度为 74%。各地市地下水开采程度与当地的水文地质条件密切相关，总体上讲开采程度都较高（60—82%），据统计 2001 年西安地区总井数 49179 眼，开采井分布密度 1.95—18.31 眼/ $\text{km}^2$ ，开采区面积  $4777.23 \text{km}^2$ ，开采量达  $12.10 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ；平均单井出水量（以 1999 年计）为  $2.62 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。宝鸡市开采区面积  $3792.65 \text{km}^2$ ，总井数 15761 眼，开采井分布密度 2.04~4.65 眼/ $\text{km}^2$ ，平均 4.16 眼/ $\text{km}^2$ ，平均单井出水量为  $1.8476 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。咸阳市开采区面积  $3671.17 \text{km}^2$ ，总井数 19118 眼，开采井分布密度 1.83~9.99 眼/ $\text{km}^2$ ，平均 5.21 眼/ $\text{km}^2$ ，平均单井出水量为  $2.9443 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。渭南市开采区面积  $5099.36 \text{km}^2$ ，总井数 29183 眼，开采井分布密度 2.04~12.29 眼/ $\text{km}^2$ ，平均 5.72 眼/ $\text{km}^2$ ，平均单井出水量为  $1.8458 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。

### 3.1.3 概化和建立模拟区水文地质概念模型

#### a) 含水层结构与介质概化

将研究区内 300 m 已深的地下水概化为潜水、浅层承压水和中层承压水三个含水层组。潜水埋深一般几米至三、四十米，底板埋深 70-90 m；浅层承压水埋深 100-180 m，中层承压水埋深 180-300 m 之间（300-600 m 为深层承压水；600 m 以下为热水）。模拟时各区含水层顶底板由钻孔资料和水文地质剖面图确定。

#### b) 边界条件概化

盆地北部边界由于可得到来自北部岩溶裂隙水补给，概化为第二类边界条件，各段单位长度补给量根据均衡分析结果给出；东部边界为黄河，由于黄河在此段为常年有水，且较宽，据多年动态观测资料分析，水位变化不大，按定水头边界处理；秦岭山区由古老结晶岩系、花岗岩构成，与盆地地下水联系微弱，可作为隔水边界处理。盆地内的河

流按水头边界处理。

潜水主要依靠大气降水，灌溉回归水、侧向径流，以蒸发、人工开采和侧向流出为排泄途径。承压水主要以局部地段开采为主和侧向流入为补给途径，含水层之间通过越流发生水力联系。考虑到模拟区域较大，对侧向径流以及河流补排量按线状源汇处理，集中开采水源地根据井群分布区面积和开采量以面状强度处理，其余各源汇项均按面状源汇处理。水文地质概念模型见图 1-4。

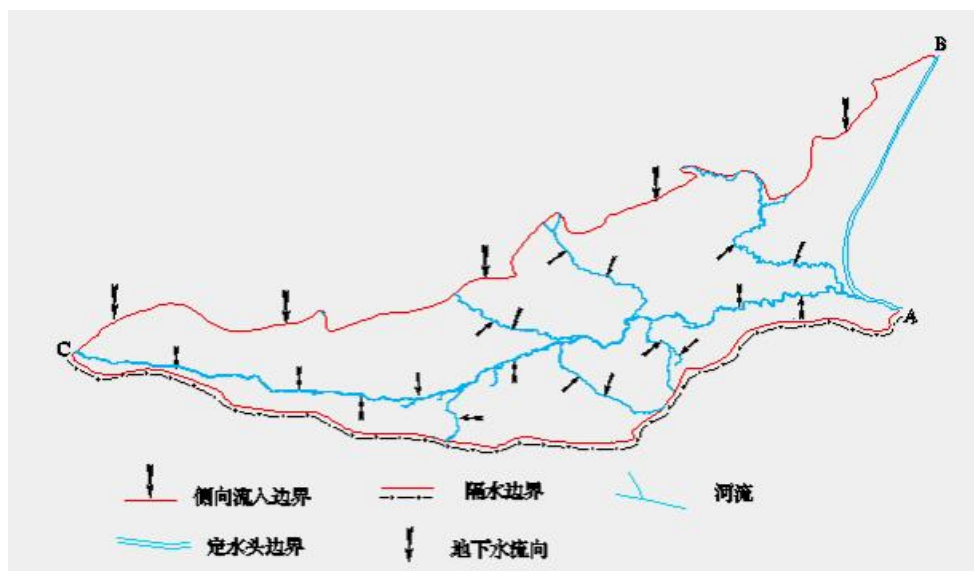


图 1-4 关中盆地水文地质概念模型示意图

### c) 水流系统概化

考虑到区内地下水流受人类活动影响已发生不同程度变化，地下水概化为非稳定三维流，潜水和承压水之间的垂向运动按层间越流处理，含水介质除了黄土含水介质概化为非均质各向异性外，其余含水介质概化为非均质各向同性。

#### 3.1.4 建立地下水流数值模型

根据上述概化的水文地质概念模型，建立地下水流数值模型，潜水含水层数学模型可表示为：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0, & (x, y, z) \in D, t > 0, \quad \text{松散岩类孔隙潜水支配方程} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0, & (x, y, z) \in D, t > 0, \quad \text{黄土孔隙裂隙潜水支配方程} \\ h(x, y, z, 0) = h_0, & (x, y, z) \in D, t = 0, \\ K_n M_i \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_i(x, y, z, t), & t > 0, i = 1, 2, \dots, M_n \\ h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t), & t > 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} h = z \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right] - (k + w) \frac{\partial h}{\partial z} + w \end{array} \right. & \text{松散岩类孔隙潜水面边界条件} \\ \left\{ \begin{array}{l} h = z \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_{xx} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - (K_{zz} + w) \frac{\partial h}{\partial z} + w \end{array} \right. & \text{黄土孔隙裂隙潜水面的边界条件} \\ \frac{K_{z1}'}{M_1} (h - H) = q(x, y, t), & t > 0 \quad \text{潜水电底边界} \end{array} \right.$$

承压含水层数学模型可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \varepsilon = S_\delta \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in D, t > 0 \\ H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) & (x, y) \in D, t = 0 \\ \frac{K_{z1}'}{M_1} (h - H) = q(x, y, t) & \text{承压水上边界条件} \\ \frac{K_{z2}'}{M_2} = 0 & \text{承压水下边界条件} \\ K_n' M_{ci} \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_i'(x, y, z, t), & t > 0, i = 1, 2, \dots, l \\ H(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t), & t > 0 \end{array} \right.$$

式中:

$h$ 、 $H$ —分别为潜水和承压水标高 (m);

$x$ 、 $y$ 、 $z$ —空间坐标 (m);

$t$ —时间 (d);

$D$ —模拟区域;

$\Gamma_1$ —第一类边界;

$\Gamma_2$ —第二类边界;

$h_0$ 、 $H_0$ —分别为潜水和承压水的初始水位 (m);

$\mu$ —潜水给水度;

$S_\delta$ —承压水弹性贮水率;

$K$ —非均质各向同性含水介质渗透系数 (m/d);

$K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$ —非均质各向异性含水介质渗透系数 (m/d);

$K'_{z_1}$ —潜水与承压水之间弱透水层垂向渗透系数 (m/d);

$M_1$ —潜水与承压水之间弱透水层垂向厚度 (m);

$q$ —潜水与承压水之间弱透水层垂向单位面积越流量 ( $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$ );

$K_n$ —潜水边界法向方向渗透系数 (m/d);

$M_i$ —潜水第二类边界第  $i$  层含水层的厚度 (m);

$q_i$ —潜水第二类边界第  $i$  层含水层单位长度交换量 ( $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ );

$K'_n$ —承压水第二类边界法向方向渗透系数 (m/d);

$M_{ci}$ —承压水第二类边界第  $i$  层含水层的厚度 (m);

$K'_{z_1}$ 、 $K'_{z_2}$ —分别为承压水上、下弱透水层渗透系数 (m/d);

$M_1$ 、 $M_2$ —分别为承压水上、下弱透水层厚度 (m)。

计算域面积为  $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，使用自动矩形网格剖分。剖分单元为 1734 个，剖分图如图 1-5 所示。

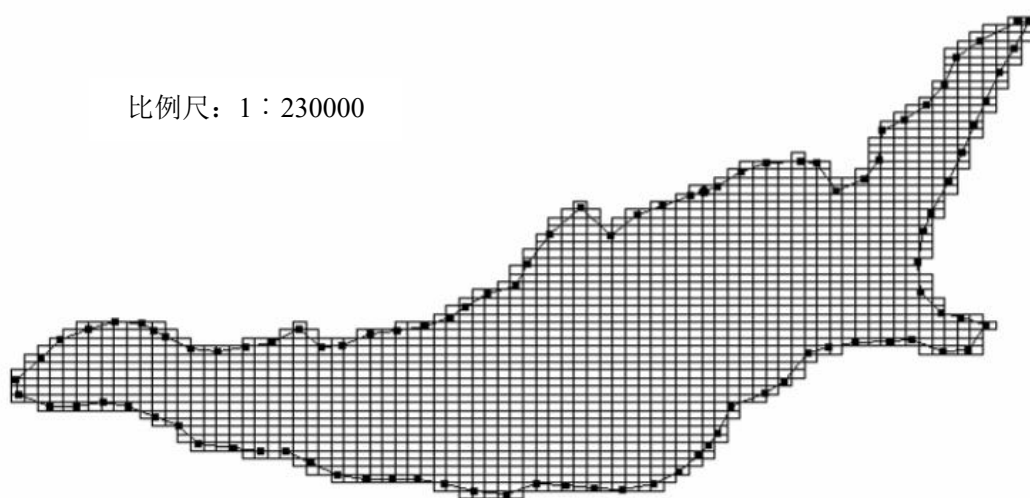


图 1-5 模拟区网格剖分平面图

以区内地质地貌为基础，以含水岩组特征及富水性，补、径、排条件以及有关勘探和研究报告为依据，进行水文地质参数分区。据此初步划分出 8 个水文地质参数区（如图 1-6 所示）。

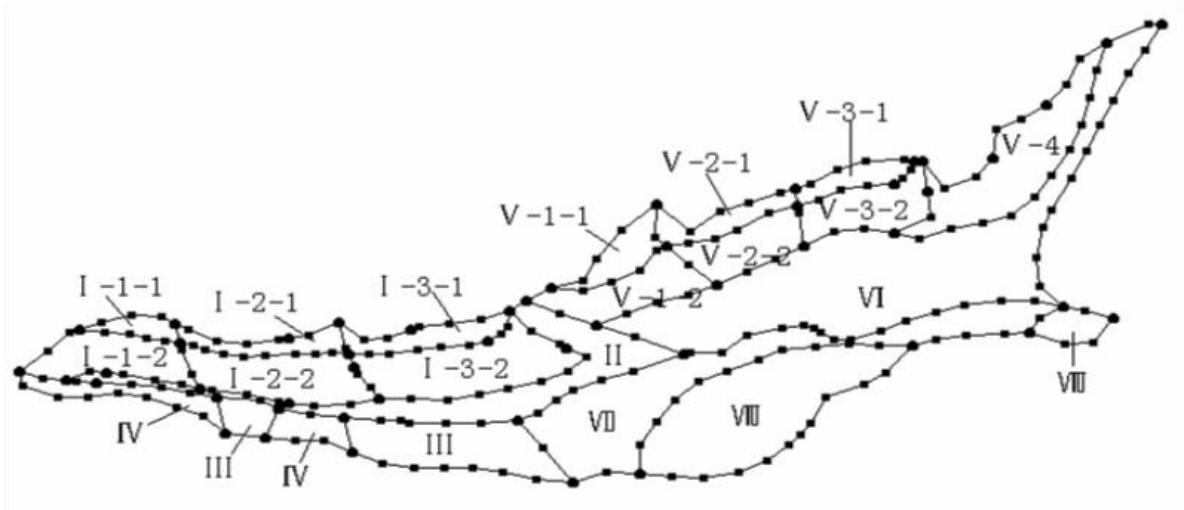


图 1-6 水文地质参数分区

其中，潜水和承压水参数分区一致。水文地质参数初值的确定是根据区内有关水文地质勘探、试验成果为依据给定各参数区水文地质参数的初值（表 1-2 所示）。

表 1-2 水文地质参数初值表

参数分区		潜水			浅层承压水			中层承压水		
		渗透系数 (m/d)		给水度	渗透系数 (m/d)		贮水系数	渗透系数 (m/d)		贮水系数
		水平	垂直		水平	垂直		水平	垂直	
I	洪积扇	20	20	0.17	15	15	0.0002	10	10	0.00002
	黄土台塬	3.5	9	0.06						
II	宝鸡-咸阳低阶地	30	30	0.20	10	10	0.0001	6	6	0.00001
III	宝鸡-户县低阶地	31	31	0.21	12	12	0.0001	7	7	0.00001
IV	宝鸡周至黄土台塬	4.5	10	0.07	13	13	0.00015	8	8	0.000015
V	洪积扇	20	20	0.18	15	15		10	10	0.00002
	冲积平原	22	22	0.06						
VI	泾阳-大荔低阶地	20	20	0.18	10	10	0.0001	5	5	0.00001
VII	西安-华阴低阶地	20	20	0.18	11	11	0.0001	6	6	0.00001
VIII	长安潼关黄土台塬	4.5	9	0.06	13	13	0.00015	8	8	0.000015

以 1998 年 1 月地下水位等水位线为初始流场（如图 1-7），选用 1998 年 1~4 月区内地下水动态观测资料和各种源汇资料为依据进行模型的识别，这一时期代表各种源汇干扰程度和变化幅度以及水位变化相对小的情况；在参数识别基础上，利用识别的参数选用 1998 年 6~9 月份各种激励因素比较强烈的时段作为对模型的验证。其选用长观测孔 38 个，长观测孔分布如图 1-8 所示。





表 1-3 各参数分区水文地质参数一览表

参数分区				潜水			潜水与浅层承压水弱透水层			浅层承压水			浅层承压水与中层承压水之间弱透水层			中层承压水		
				渗透系数 (m/d)		给水度	渗透系数 (m/d)		贮水系数	渗透系数 (m/d)		贮水系数	渗透系数 (m/d)		贮水系数	渗透系数 (m/d)		贮水系数
				水平	垂直		水平	垂直		水平	垂直		水平	垂直		水平	垂直	
I	凤翔	洪积扇	I-1-1	25	25	0.19	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	15	15	0.0002	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10	10	0.00002
		黄土台塬	I-1-2	3	8	0.06												
	岐山扶风	洪积扇	I-1-2	23	23	0.19												
		黄土台塬	I-2-2	3.5	9	0.06												
	乾县礼泉	洪积扇	I-3-1	21	21	0.17												
		黄土台塬	I-3-2	3.5	8.5	0.05												
II	宝鸡-咸阳低阶地		II	30	30	0.20	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10	10	0.0001	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	6	6	0.00001
III	宝鸡-户县低阶地		III	31	31	0.22	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	12	12	0.0001	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	7	7	0.00001
IV	宝鸡周至黄土台塬		IV	4.5	10	0.07	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	13	13	0.00015	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	8	8	0.000015
V	三原	洪积扇	V-1-1	23	23	0.2	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	15	15		10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10	10	0.00002
		冲积平原	V-1-2	20	20	0.18												
	富平	洪积扇	V-2-1	21	21	0.16												
		黄土台塬	V-2-2	3	8	0.06												
	蒲城	洪积扇	V-3-1	21	21	0.15												
		黄土台塬	V-3-1	3.2	8	0.05												
	合阳黄土台塬		V-4	3	8.6	0.06												
VI	泾阳-大荔低阶地		VI	20	20	0.18	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10	10	0.0001	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	5	5	0.00001
VII	西安-华阴低阶地		VII	20	20	0.17	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	11	11	0.0001	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	6	6	0.00001
VIII	长安潼关黄土台塬		VIII	4.5	9	0.06	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	13	13	0.00015	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	8	8	0.000015



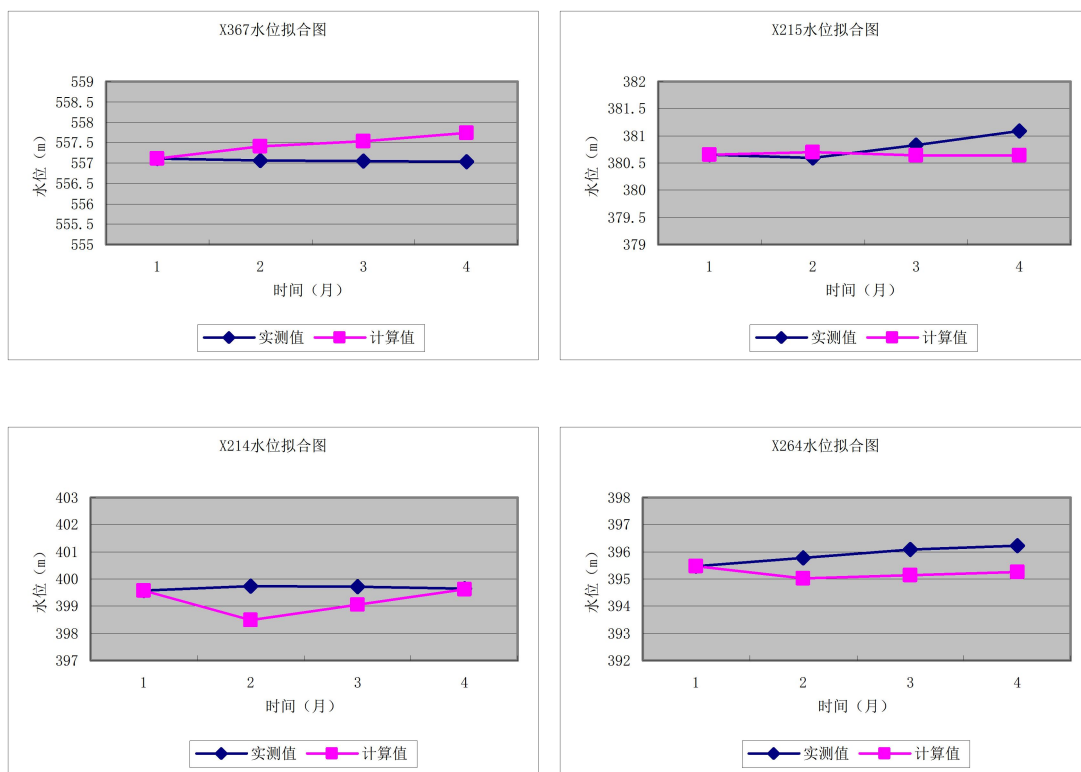


图 1-9 模型识别期间部分观测孔实测水位与模型计算水位之间拟合图

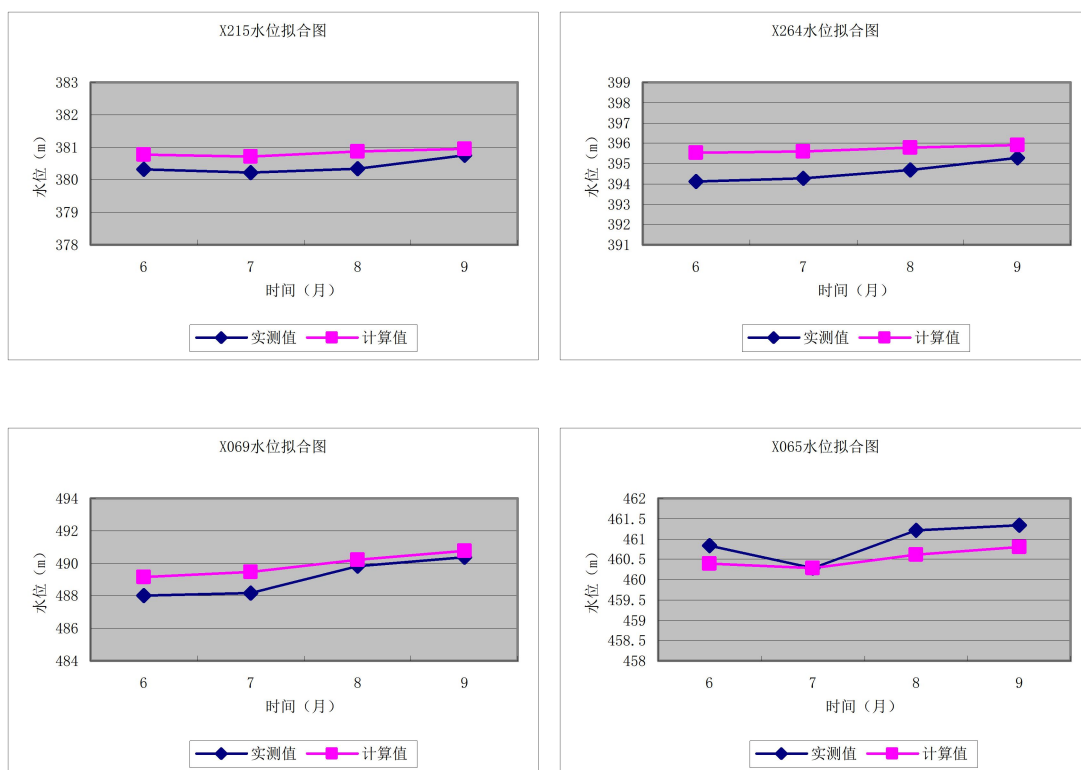


图 1-10 模型验证期间部分观测孔实测与模型计算水位之间拟合图

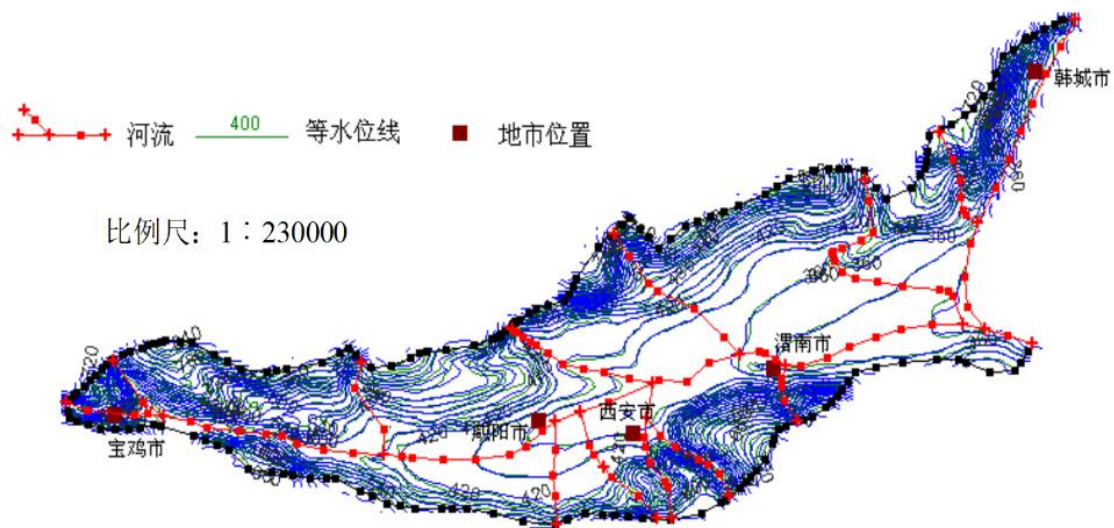


图 1-11 流场拟合图

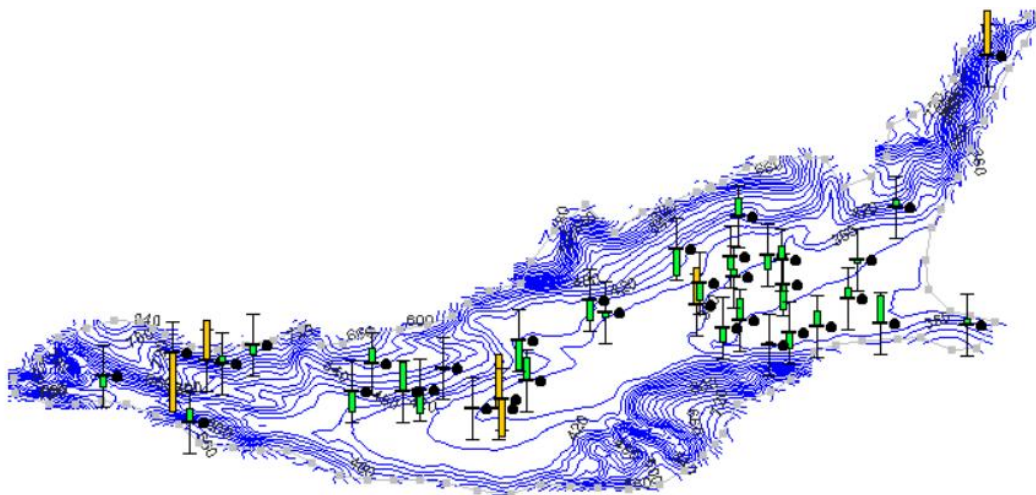


图 1-12 观测孔水位与计算水位误差分布图

表 1-4 拟合误差绝对值的平均值分布表

误差绝对值	观测孔个数	比例 (%)
0~0.5	24	63.2
0.5~1.0	10	26.3
1.0~2.0	4	10.5
>2.0	0	0
合计	38	100

模型识别与验证期间数值模型计算的地下水均衡如表 1-5 所示。

表 1-5 地下水均衡分析（单位： $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ）

	均衡项	潜水含水层	浅层承压水含水层	中层承压水含水层
补 给 项	降水入渗量	20.33		
	渠系、渠灌渗漏量	2.13		
	库塘水渗漏量	1.9		
	井灌回归量	2.32		
	河流渗漏量	6.39		
	山前侧向补给量	0.4443	0.177	0.118
	渭河侧向激发量	3.06		
	越流补给量	0.095	0	0.109
	合计	36.6693	0.177	0.227
排 泄 项	农灌开采量	11.878		
	城乡工业开采量	3.264		
	傍河开采量	1.726	0.695	4.15
	蒸发量	4.573		
	河流排泄量	1.822		
	越流排泄量	0	0.206	0
	侧向排泄量	3.375		
	合计	26.638	0.911	4.15

由图 1-9~1-12 和表 1-3~1-5 可以看出：

1) 无论是降速场还是梯度场的拟合，其形态的宏观效果较好，反映了地下水系统的结构、传输与调蓄功能；

2) 模型识别与验证期间拟合曲线的绝对误差小于 0.5m 占 63.2%，0.5~1.0m 占 26.3%，1.0~2.0m 占 10.5%，拟合程度相对较好；

3) 反映的水文地质参数再现了水文地质规律，参数分区和参数值与地下水分布规律基本一致；

4) 由模型计算的各均衡要素的分布规律和数值大小基本与上节均衡法计算的典型年水均衡结果相差不大。

综上，建立的模拟模型基本反映了研究区地下水系统运动规律，可以用来对可采资源进行评价以及对水动力场进行评价以及对水动力场演化规律进行预测。

### 3.1.6 情景设置与模拟预测

关中盆地除了城镇供水为集中开采外，农田供水及农村生活用水基本上为分

散间歇开采，为了评价本区可开采资源量，首先要根据区内地下水资源状况及经济技术条件等确定开采条件，包括开采地段、开采方式和开采量等。在评价可采资源量时基于以下考虑：

(1) 农田灌溉及农村生活用水，依据区内水利、地矿等部门规划的宜井区和地下水资源评价成果，结合多年开采实践，确定合理开采系数，得到不同地段可采模数如表 1-6 所示。

表 1-6 关中盆地分散开采模数一览表

分区	可采模数 ( $10^4\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )
凤翔-礼泉黄土台塬	12.386
宝鸡-咸阳低阶地	11.388
宝鸡-户县低阶地	55.9
宝鸡-周至黄土台塬	7.592
三原-合阳黄土台塬	9.39
泾阳-大荔低阶地	10.97
西安-华阴低阶地	14.99
长安-潼关黄土台塬	2.90

(2) 城镇已建和规划建设的集中供水水源地开采按勘探时评价允许开采量和拟开采量加入模型。

(3) 预报时依据降水系列资料按多年平均到月参与运算，其余源汇按区内实际多年平均值给出。

据此，以月为计算段，以 1998 年 1 月流场为初始流场，预报 5 年，其流场及观测孔历时曲线如图 1-13 和 1-14 所示。

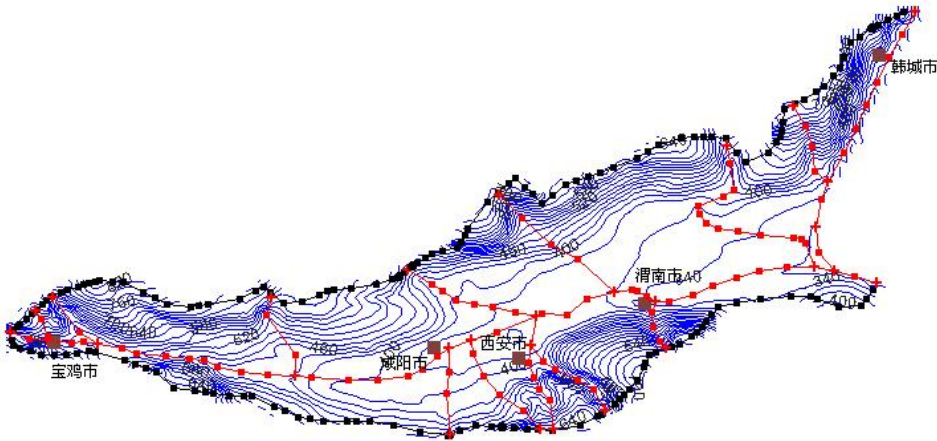


图 1-13 模型运行 5 年后的流场预测图

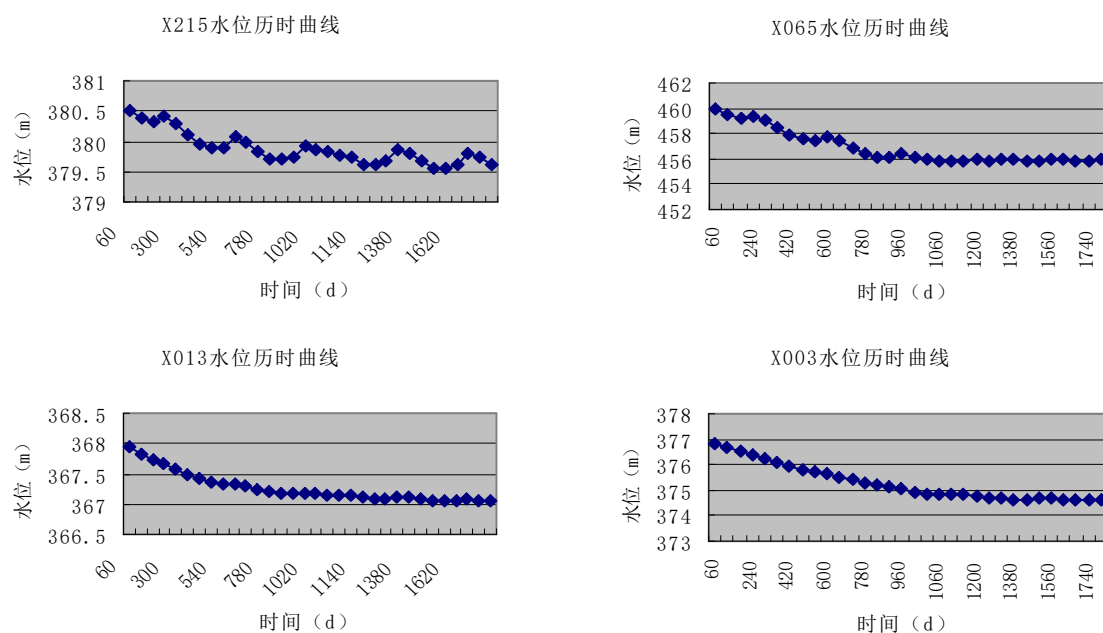


图 1-14 部分观测孔历时曲线图

表 1-7 各区可采资源量一览表 单位:  $10^8 \text{m}^3/\text{a}$

亚区	可采资源量( $10^8 \text{m}^3/\text{a}$ )	亚区	可采资源量( $10^8 \text{m}^3/\text{a}$ )
凤翔-礼泉黄土台塬	4.40	三原-合阳黄土台塬	3.90
宝鸡-咸阳低阶地	1.70+2.15	泾阳-大荔低阶地	4.50+0.11
宝鸡-户县低阶地	6.80+2.47	西安-华阴低阶地	3.30+2.01
宝鸡-周至黄土台塬	0.40	长安-潼关黄土台塬	0.90
合计	25.90+6.74		

注：“+”后面代表傍河水源地允许开采量

由图 1-14 和表 1-7 可见，从多年平均意义上来看，在区内开采  $32.64 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  的情况下，模型运转五年后，观测孔水位降已趋稳定，另外，由观测孔降速场曲线来看也反映了以丰补歉的开采方式。因此，在区内开采  $32.64 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ （含  $6.74 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  岸边集中供水水源地开采量）是有保证的，可作为区内可开采资源量。该量与均衡法评价的可采资源量基本一致，仅仅小  $0.4 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。综上，推荐  $32.64 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  作为区内可采资源量。

## 3.2 秃尾河流域地下水仿真模拟及预测

### 3.2.1 模拟目标与范围

秃尾河流域是黄河“几”字弯的典型流域，发源于陕西省神木市锦界镇，主

要流经陕西省神木市，地处毛乌素沙漠与黄土高原的接壤地带，该流域的水文地质概况与生态环境概况在黄河“几字弯”地区具有一定的代表性。流域多年平均降水量为 377.4mm，主要集中在 6-9 月，且多暴雨，蒸发量较大，通常在 1200-1500mm。河流全长约 139.6km，流域面积约 3478km<sup>2</sup>，西北地区地势较高，东南地区地势较低，由西北向东南地貌可分为湖群高平原区、沙漠区、盖沙丘陵区、黄土丘陵沟壑区。从“补给-径流-排泄”水文循环过程来看，研究区地下水首要补给方式为降水入渗；在径流阶段，地下水体沿既定流向运移，最终通过两类关键途径实现排泄：向黄河、秃尾河等天然地表水体的自然排泄和人工开采与蒸发(含植被蒸腾)构成的人工及蒸发排泄。地理位置图如图 2-1 所示。

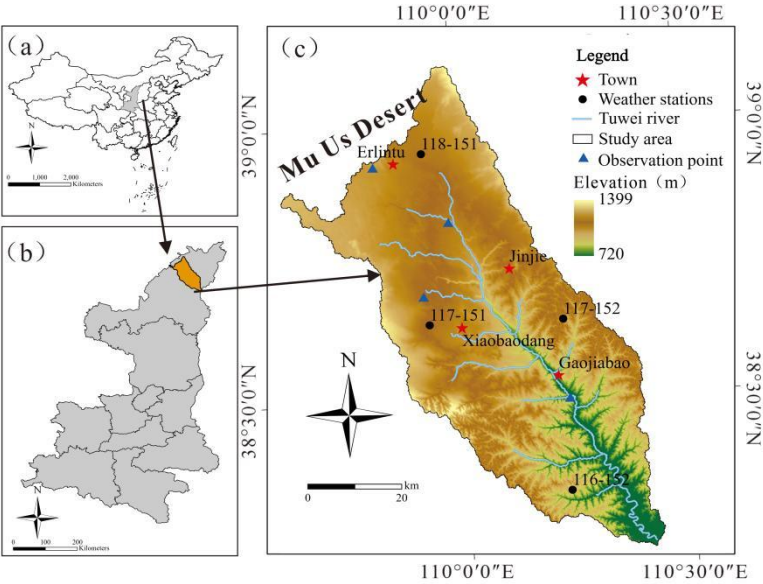


图 2-1 秃尾河流域地理位置图 (a) 研究区在中国位置；(b)研究区在陕西省位置；  
(c)秃尾河流域地理位置

3.2.2 资料收集与现场调查

数据集包括钻孔、气象、遥感、水文、地形、地下水位数据(表 1)。通过整合流域内钻孔揭露的地质结构数据、长期观测的水文气象数据及高精度地形地貌数据,构建流域尺度的三维水文地质概念模型与数值模型；基于所建模型开展区域地下水水位动态模拟，结合模拟结果与地表高程数据、地貌类型分区。

本研究共获取 106 个钻孔数据，其在空间上分布均匀。为提升地质结构模型的准确性与代表性，我们对岩性组成相近的钻孔进行了筛选与优化，最终选定 37 个具有代表性的钻孔作为建模的基础数据。

气象数据来源于研究区内及周边的 4 个气象站（分别为高家川、小保当、锦



界和尔林兔)，这些站点的观测数据能够较好地代表整个研究区域的气候特征。气象数据由设于研究区内及周边的 4 个气象站（高家川、小保当、锦界、尔林兔）采集，能够有效反映区域整体气候状况。各站使用雨量计进行观测，提供了 2002 年至 2018 年的逐日降雨量数据；神木市气象站另采用蒸发皿测定法，估算了 2002 年至 2018 年的年潜在蒸散量。

3.2.3 概化和建立模拟区水文地质概念模型

a) 含水层结构与介质概化

流域三维地质结构模型区域含水层以砂与黄土为主。在秃尾河流域北部地表覆盖着第四系风积沙，厚度从 2~30m 不等，可将其划分为单一的含水层；由北向南，秃尾河流域南部的风积沙几乎消失，覆盖着从 5~80m 不等的第四系黄土，可概化为单一的潜水含水层。其下伏地层为较厚的白垩系砂岩，不存在较大的断裂及构造，因此将其划为单一的含水层；白垩系砂岩下伏侏罗系基岩，渗透性极差，因此将其划为隔水层。因此将模型概化为较为简单的含水层-隔水层二层结构。

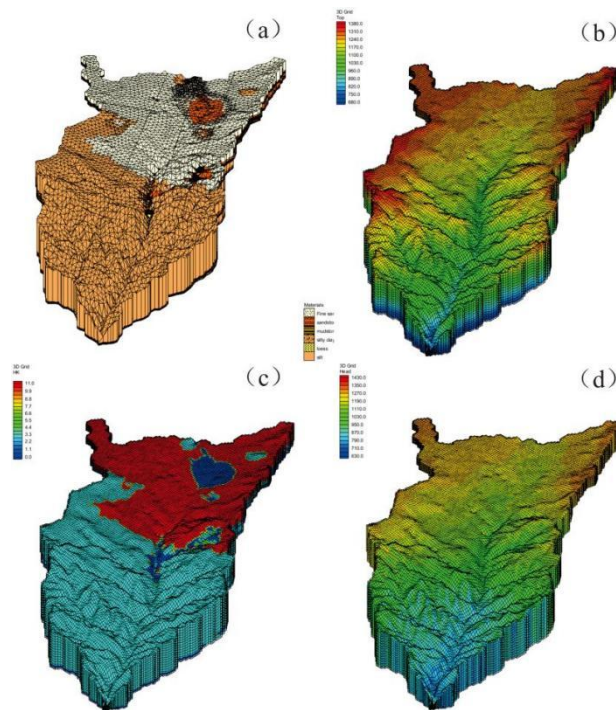


图 2-2 模型含水层结构及参数分区图 (a) 地层结构图；(b) 含水层顶板设置；(c) 含水层垂向渗透系数分区；(d) 含水层底板设置

b) 边界条件概化

通过分析模拟区内水文地质条件以及地下水动力场，边界条件概化如下：

秃尾河流域的含水系统东西两侧以山区和丘陵台地为主，构成地下水的主要

补给区；北部边界整体接受来自红碱淖流域的侧向补给。流域内降水大部分入渗补给地下水，少部分形成地表径流汇入沟道，并最终进入秃尾河。研究区的边界条件由通用水头边界(General-Head Boundary)和零通量边界(Zero Flux Boundary)共同构成，具体设置如下：

北侧边界与红碱淖相邻，设为侧向补给边界（高渗透性边界）；东北与西北边界同样接受来自红碱淖乃至更远区域的补给，设为弱透水边界；东南和西南边界属黄土覆盖的丘陵沟壑区，下伏砂岩地层；南端为秃尾河汇入黄河处，设为通用水头边界；第 1 层上边界为自由水面边界；第 2 至第 7 层顶底板设为流量边界；第 8 层底板设置为零流量边界。

秃尾河流域地处毛乌素沙地与黄土高原过渡带，大气降水是其地下水的主要补给来源。为准确刻画降水入渗过程，本研究采用了流域内四个气象站（高家川、小保当、锦界、尔林兔）2001 至 2019 年的逐日降雨观测数据。地下水排泄主要通过两种关键途径实现：一是向黄河、秃尾河等地表水体的自然径流排泄，二是以人工开采和蒸发（含植被蒸腾）为主的人工及蒸散排泄。地下水自然排泄量的估算基于高家川水文站的径流观测数据，采用排泄法进行设定；而人工开采量与蒸发散量（含植被蒸腾）则依据《陕西省水资源公报》所提供的数据，同样通过排泄法进行量化。水文地质参数（如渗透系数、孔隙度和给水度等）主要依据全国地质资料馆中的钻孔数据，结合试验含水层岩性特征进行设定。

### **c) 水流系统概化**

根据地下水流场，模拟区内水力坡度除北部风积沙覆盖区域较大外，其余地段一般不超过 2%，地下水流速较小，符合达西定律。按照含水岩组划分，秃尾河流域地下水主要分为分布于秃尾河流域北部的第四系沙层与下伏白垩系含水层中的孔隙水，其水文地质参数呈现非均质性。受季风气候和人类活动的双重影响，模拟区均衡要素对地下水的补给、排泄量在时间上存在明显差异。因此将地下水运动概化为非均质、三维非稳定流。

#### **3.2.4 建立地下水流数值模型**

根据收集到的钻孔柱状图和地质、水文地质剖面图，基于 GMS 软件平台，使用钻孔子模块对钻孔资料进行整理及地质剖面图绘制；使用 Solid 子模块建立三维地质结构模型，对秃尾河流域地质结构进行概化。



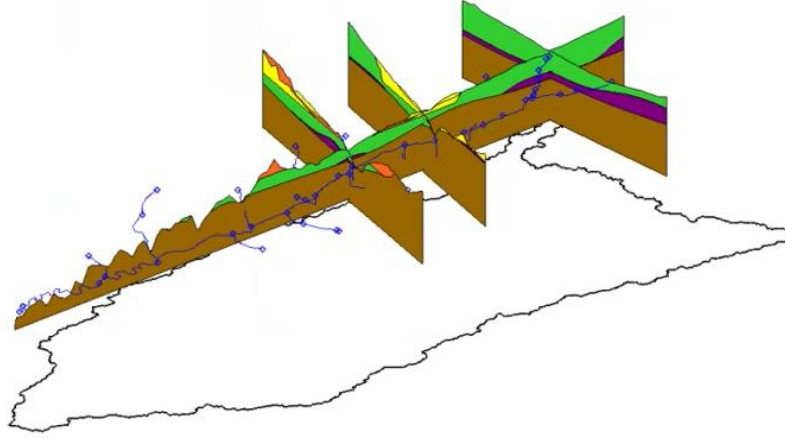


图 2-3 地层结构模型剖面示意图

研究区内，地下水运动方式自上游至下游呈现明显的空间分异：上游区域以垂向运动为主，向下游逐渐过渡为以水平运动为主。同时，水文地质参数在不同水文地质单元间存在较强的空间变异性，各类源汇项也表现出显著的年际与季节性变化特征。因此，结合研究区的水文地质特征，可将该区域地下水流系统概化为如下控制方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y, z) \in D, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in D \\ H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = v(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \sigma(H_r - H) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{array} \right.$$

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）；

$W$  为渗流计算域内的源汇项（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);  
 $H_l$  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);  
 $\sigma$  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);  
 $\Gamma_0$  为渗流计算域的上边界(潜水面);  
 $\Gamma_1$  为第一类边界,  $\Gamma_2$  为第二类边界,  $\Gamma_3$  为第三类边界;  
 $n$  为边界的外法线方向。

基于有限差分方法求取以上数学模型的数值解, 使用 GMS 软件对计算区域进行网格剖分。为尽可能提高模型的模拟精度, 以及考虑到水文地质条件的空间变异性, 采用 150m×150m 的正交等距剖分。模拟区域实际面积 3478km<sup>2</sup>, 横向剖分为 150 行, 纵向剖分为 100 列, 垂向剖分为 3 层, 活动单元格共计 78008 个。

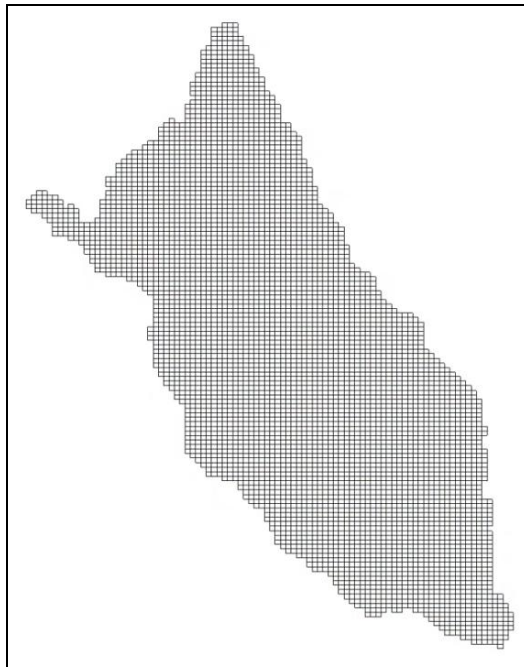


图 2-4 模型网格剖分平面图

#### (1) 时间离散

模拟期选取为 17 年, 按照年时间序列共分为 17 个应力期。

## （2）水文地质参数初值与分区

钻孔数据均匀分布于试验区内，共 106 孔，经过将具有相同岩性构成的钻孔进行优化，最终选用其中的 37 孔进行地质结构建模。通过收集前人相关试验成果及《陕西省神木县沟岔水源地 1:5 万供水水文地质勘探报告》、《陕西神木县区域水文地质调查报告》，将研究区内的岩性确定为五种，分别为粉细砂、中粗砂、黄土、亚砂土、泥岩。

表 2-1 主要岩性水文地质参数

岩性	渗透系数 x	渗透系数 y	给水度
粉细砂	5	1	0.18
中粗砂	30	3	0.14
黄土	1	10	0.1
亚砂土	10	2	0.2
泥岩	8	1	0.08

### 3.2.5 模型校准、验证与不确定性分析

以 2002 年研究区内获得的源汇项资料和《陕西省地下水位统计年鉴》记录的地下水位资料作为模型识别与验证的依据。选择 2002 年 1 月 1 日~2003 年 1 月 1 日的地下水流场进行模型识别，以 2002 年 1 月流场作为初始流场。在模型识别中，通过对水文地质参数、边界条件、含水层结构和地下水补排量及其时空分配进行适当的调整。在模型识别的基础上，以 2002 年 1 月 1 日~2018 年 1 月 1 日的源汇项资料和观测孔动态数据进行模型验证。利用模型整个模拟期间 2002 年 1 月至 2018 年 12 月的 17 个应力期的模拟结果与所收集到的秃尾河流域的 3 个观测井地下水位数据及 1 个径流观测站的河川基流量数据作模拟水位与观测水位散点折线图进行验证。

在模型识别的基础上，以 2002 年 1 月 1 日~2018 年 1 月 1 日的源汇项资料和观测孔动态数据进行模型验证。利用模型整个模拟期间 2002 年 1 月至 2018 年 12 月的 17 个应力期的模拟结果与所收集到的秃尾河流域的 3 个观测井地下水位数据及 1 个径流观测站的河川基流量数据作模拟水位与观测水位散点折线图，结果显示模拟值与实测值在趋势上呈一致性。使用平均误差（MAE）、均方根误差（RMSE）和决定系数  $R^2$  作为拟合优度的指标。MAE、RMSE 和  $R^2$ （0.01 水平上关系显著）。

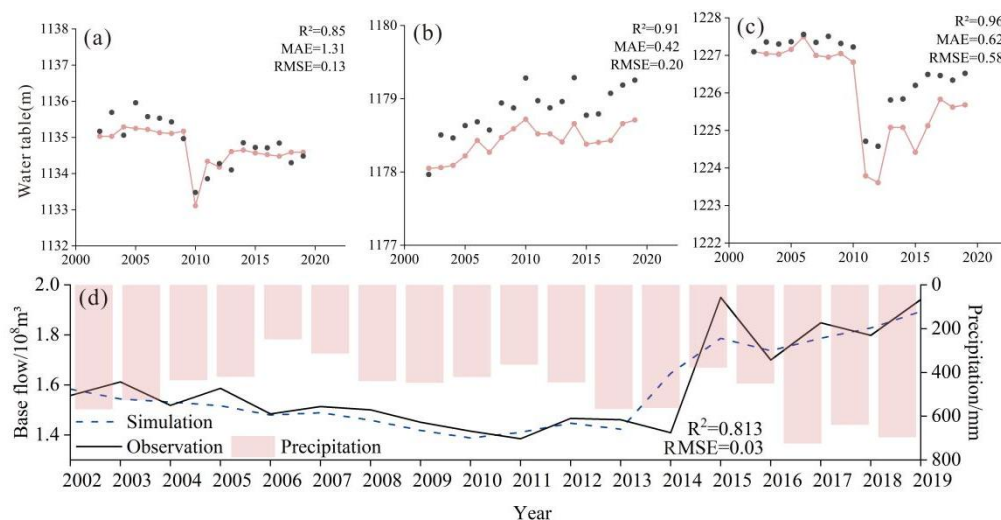


图 2-5 (a)502 号井地下水位模拟与实测的时间变化趋势;(b)504 号井地下水位模拟与实测的时间变化趋势;(c)508 号井地下水位模拟与实测的时间变化趋势;(d)基流量模拟与实测的时间变化趋势

选择 2002 年 1 月 1 日~2003 月年 1 月 1 日的地下水流场进行模型识别，以 2002 年 1 月流场作为初始流场。在模型识别中，通过对水文地质参数、边界条件、含水层结构和地下水补排量及其时空分配进行适当的调整，使模型计算结果能够更好的与观测结果相匹配。

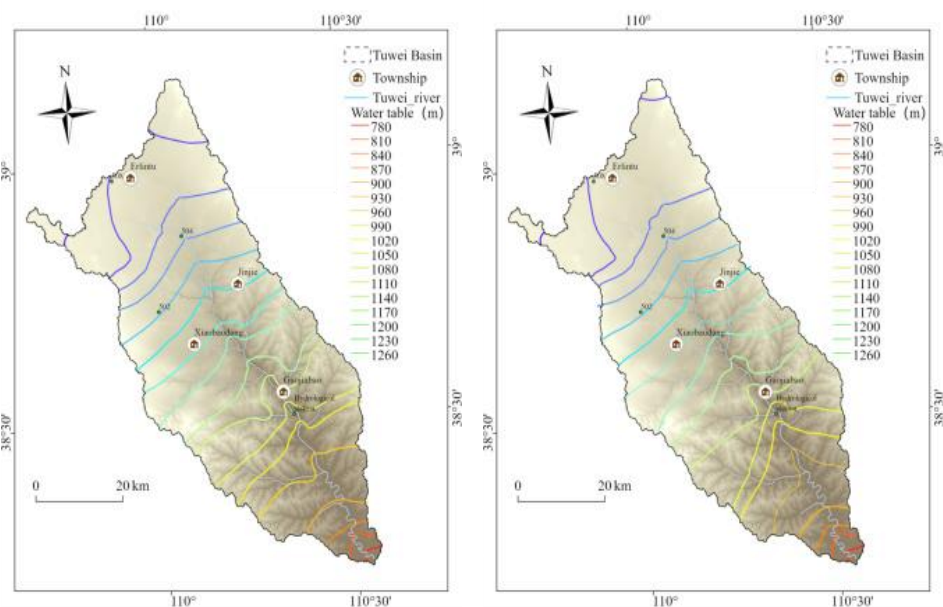


图 2-6 模型调整后模拟与实测 2003 年地下水位线对比图

经手动校准的计算水位与观测水位在模型整个模拟期基本拟合良好。说明该模型有效模拟了研究区含水系统的地下水动力场，能够再现地下水位的空间

分布和地下水循环的区域特征，可用于地下水文过程预测。

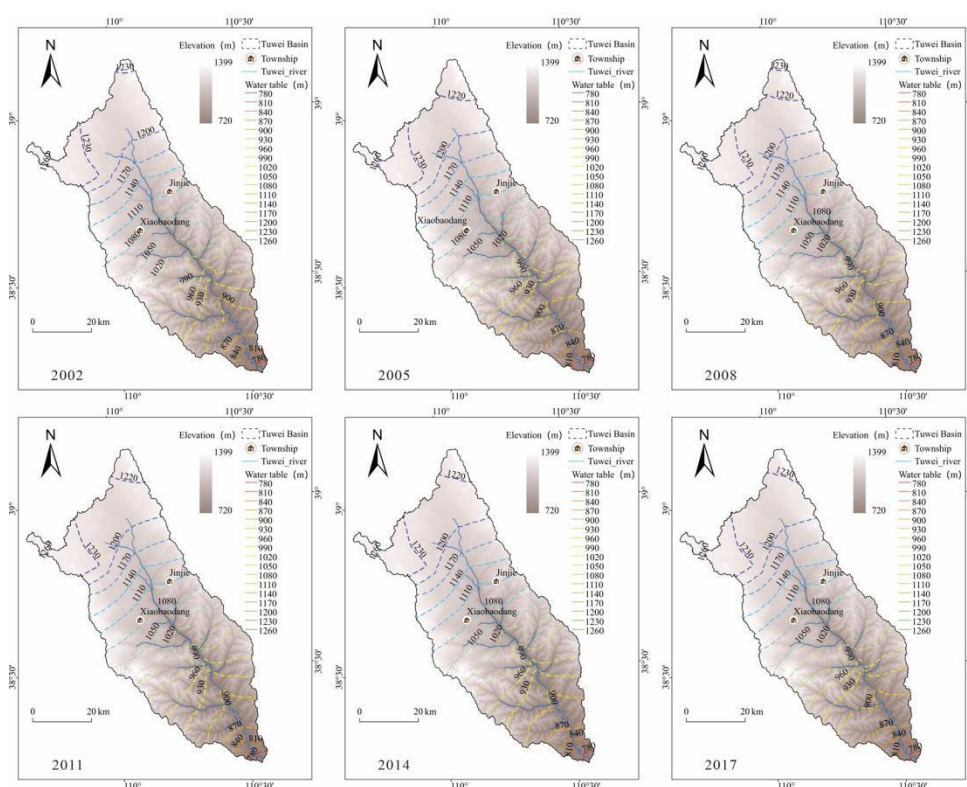


图 2-7 地下水位模拟演化过程

### 3.2.6 情景设置与模拟

2010 年至 2018 年间，陕北地区的降水量呈现显著的增长趋势，其平均增长速率达到每年 14.3 mm。这一持续且逐步增加的降水模式，对于地处干旱半干旱气候带的陕北地区而言，具有极为重要的生态与水文意义。为了深入探究降水量变化对区域地下水系统的具体影响，本研究选取秃尾河流域作为典型研究区域，通过预设不同的降水量变化情景，旨在更为精准地模拟和定位在降水量发生增减波动后，该区域地下水位所可能产生的相应变异情况与响应规律。

#### (1) 预设降水量增加 30% 的情景分析

基于秃尾河流域内高家堡气象站所监测的 2002 年至 2018 年逐日降水数据序列，将原始数据中的每日降水量统一上调 30%，以模拟降水显著增多的气候状况。通过对比分析降水量变化前后地下水位的动态，图 2-8 直观展示了在降水量维持不变与降水量增加 30% 两种条件下，秃尾河流域的地下水位的空间分布与起伏变化的对比情况，揭示了降水大幅增加对地下水补给过程的强化效应。



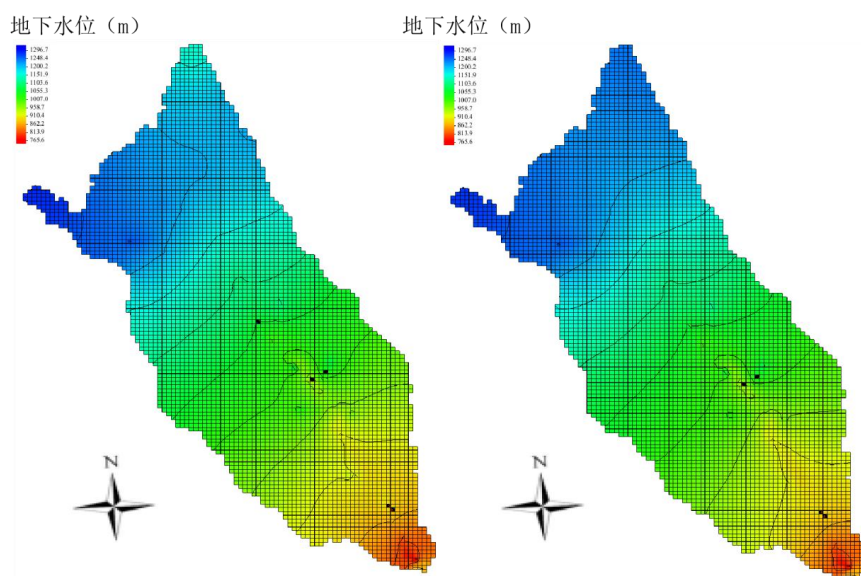


图 2-8 实际降水模拟与增加 30%降水模拟 2018 年地下水位等值线图

### (2) 预设降水量增加 10%的情景分析

在此情景下，同样依据高家堡气象站 2002-2018 年的日尺度降水观测资料，将每日降水量数据增加 10%，用以模拟降水小幅增加的气候情境。图 2-9 提供了降水量未发生变化与降水量增加 10%两种模拟情景下，研究区域地下水位线的详细对比图示。该分析有助于理解在降水略有增长的背景下，地下水系统所呈现的较为缓和的响应特征与水位波动模式。

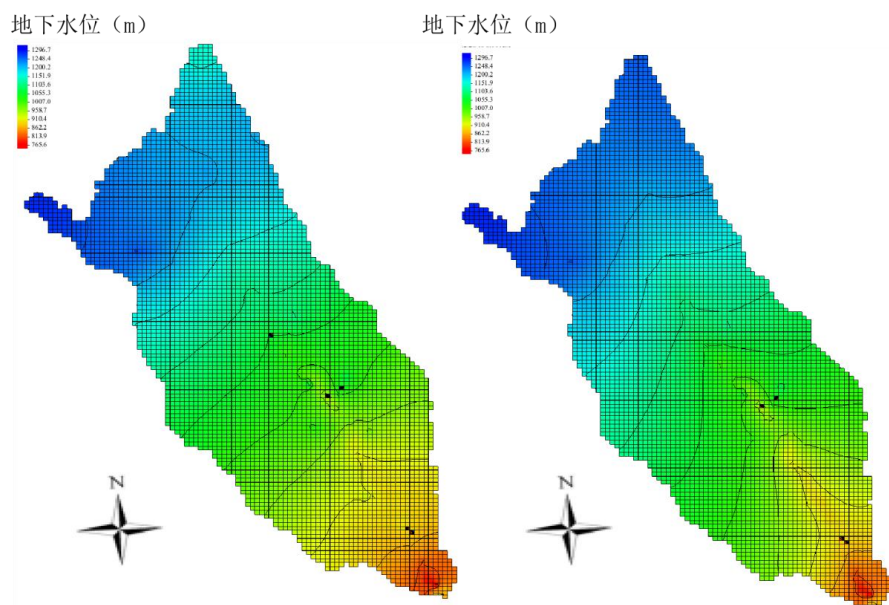


图 2-9 实际降水模拟与增加 10%降水模拟 2018 年地下水位等值线图

### (3) 预设降水量减少 20%的情景分析

本情景旨在模拟可能出现的干旱缺水状况，基于相同的 2002-2018 年日降水

数据序列，将每日降水量数据削减 20%。这一设定可为秃尾河流域遭遇典型枯水年份或干旱期提供重要的参考依据和预测视角。图 2-10 清晰对比了在降水量保持基准不变与降水量减少 20%两种条件下，流域内地下水位线的分布差异与变化趋势，从而评估降水减少对地下水资源的负面影响及潜在的枯水风险。

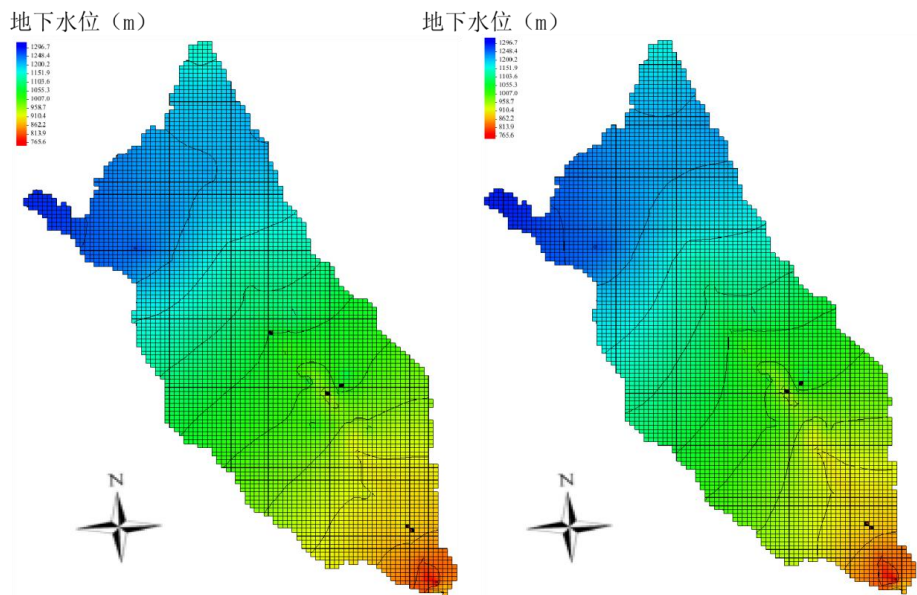


图 2-10 实际降水模拟与减少 20%降水模拟 2018 年地下水位等值线图

情景模拟结果表明：秃尾河流域地下水对降水变化敏感，降水增减幅度与地下水位升降幅度呈正向线性相关。降水量增加 10%时，地下水位整体小幅抬升，空间分布格局基本保持稳定；降水量增加 30%时，降水入渗补给显著增强，地下水位整体抬升明显，对流域地下水涵养与生态水文保障具有积极作用；降水量减少 20%时，地下水补给量明显下降，地下水位普遍降低，局部区域出现明显水位回落，枯水风险显著上升，对流域水资源安全与生态稳定构成不利影响。

三种情景清晰揭示，降水是驱动秃尾河流域地下水系统动态变化的关键自然因子，降水波动直接决定地下水补给强度与水位时空演变。

四、知识产权说明

本标准知识产权归研制单位所有，本标准没有知识产权争议。

五、采标情况

无。

## 六、重大意见分歧的处理

无重大意见分歧。

## 七、其他应说明的事项

无。