

赵晓东, 周静虎, 王曦阅, 等. 嘎达苏小流域雨洪资源利用涵养地下水可行性应用研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 144-159. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.011

ZHAO Xiaodong, ZHOU Jinghu, WANG Xiyue, et al. Feasibility study on stormwater resource utilization for groundwater recharge in Gadasu small watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 144-159. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.011

# 嘎达苏小流域雨洪资源利用涵养地下水 可行性应用研究

赵晓东<sup>1,2,3</sup>, 周静虎<sup>1</sup>, 王曦阅<sup>1</sup>, 李 帅<sup>1</sup>

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 辽宁省岩土与结构工程技术研究中心, 辽宁 大连 116622; 3. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100080)

**摘要:**【目的】雨洪资源利用对于加强小流域综合治理, 缓解半干旱区水资源短缺问题至关重要。由于小流域生态系统对地下水变化高度敏感, 因此雨洪资源利用补给地下水潜力的评估尤为重要, 这也是半干旱区地下水建设可行性研究的核心内容。【方法】以北方半干旱区的小流域地下水工程为背景, 利用修正后的曲线径流数模型(SCS-CN), 分析1981—2023年降雨产生的地表径流量, 采用皮尔逊三型(P-III)曲线适线法选取25%、50%、75%降雨频率产生的地表径流量作为不同工况代表值, 并基于MODFLOW边界条件法构建地表水-地下水耦合数值模型, 探讨不同工况下地下水流场的变化情况, 量化地下水调节汛期雨洪, 促进以丰补枯的潜力。【结果】结果显示:(1)采用区域解析雨量代替雨量站观测雨量, 可以解决观测数据异常值多、离散性大的问题, 月、季度降雨拟合系数平均值为0.73;(2)修正的SCS-CN模型初损率 $\lambda = 0.02$ , 预测地表径流结果与水文比拟法设计径流量基本一致;(3)通过雨洪资源涵养地下水可以大幅度提升地下水位高度, 不同降雨保证率条件下地下水位可稳定抬升1.66 m, 蓄滞洪区拦蓄径流量呈几何倍数增加, 占总径流量的41.9%、73.2%和109.15%。【结论】结果表明:修正后的SCS-CN模型能够准确预测干旱区和半干旱区降雨产生的地表径流, 尤其适用于数据不易测量、土壤信息匮乏的小型农业流域。采用切换边界条件法构建的地表水-地下水耦合模型可以更好地反映雨洪涵养工程建设前后上游地下水流场的变化情况。同时, 蓄滞洪区收集的雨洪资源能够将汛期洪水转化为非汛期供水, 实现雨洪资源的合理利用。因此, 地表径流的收集潜力对于地下水库的建设非常重要, 在一定程度上决定了工程研究的可行性。研究可为北方半干旱区及类似山区小流域综合治理提供理论支撑与技术参考。

**关键词:** 雨洪资源利用; 修正SCS-CN模型; 降雨; 径流; 地表水-地下水耦合模型; 地下水场; 地下水库

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P333.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0144-16



收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-01-01; 录用日期: 2025-01-10; 网络出版日期: 2025-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374046)

作者简介: 赵晓东(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、GIS工程模型耦合以及小流域综合治理研究。E-mail: xdong\_zhao@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Feasibility study on stormwater resource utilization for groundwater recharge in Gadasu small watershed**ZHAO Xiaodong<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Jinghu<sup>1</sup>, WANG Xiyue<sup>1</sup>, LI Shuai<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China; 2. Research Center for Geotechnical and Structural Engineering Technology of Liaoning Province, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China; 3. Technology Innovation Center for Ecological Restoration in Mining Areas, Ministry of Natural Resources, Beijing 100080, China)

**Abstract:** [Objective] The utilization of stormwater resources plays a critical role in enhancing integrated small watershed management and alleviating water shortage in semi-arid regions. The small watershed ecosystems are highly sensitive to groundwater level fluctuations, making the evaluation of stormwater resource utilization for groundwater recharge essential. This also constitutes a key aspect of feasibility studies for underground reservoir construction in semi-arid regions. [Methods] An underground reservoir project in a small watershed within northern semi-arid regions was selected as the study background. Surface runoff generated by rainfall from 1981 to 2023 was analyzed using a modified SCS-CN (curve number) model. The Pearson Type III (P-III) curve fitting method was employed to determine representative runoff values at 25%, 50%, and 75% rainfall frequencies under different conditions. A coupled surface water-groundwater numerical model was established using the MODFLOW boundary condition method to simulate groundwater flow field variations under different conditions. Furthermore, the potential of groundwater reservoirs to regulate stormwater during flood seasons and balance seasonal water availability was quantified. [Results] The result showed that: (1) utilizing regional analytical rainfall data instead of rain gauge observations effectively addressed issues of data anomalies and high dispersion, with average monthly and seasonal rainfall fitting coefficients of 0.73. (2) The initial abstraction ratio in the modified SCS-CN model was determined to be 0.02, and the predicted runoff result closely matched design runoff values derived from the hydrological analogy method. (3) Groundwater recharge through stormwater conservation significantly increased groundwater levels, with a stable rise of 1.66 m under different rainfall frequency conditions. Additionally, runoff retention in flood detention areas showed exponential growth, accounting for 41.9%, 73.2%, and 109.15% of total runoff, respectively. [Conclusion] The result demonstrates that the modified SCS-CN model accurately predicts rainfall-induced surface runoff in arid and semi-arid regions, especially for small agricultural watersheds where direct measurements are challenging and soil information is limited. The coupled surface water-groundwater model established using the switching boundary condition method effectively captures variations in upstream groundwater flow fields before and after the implementation of stormwater conservation project. Furthermore, stormwater collected in detention areas can be converted into a water supply for the non-flood season, ensuring the rational utilization of stormwater resources. Therefore, the collection potential of surface runoff is crucial for the construction of underground reservoir and largely determines project feasibility. The findings provide theoretical support and technical references for integrated watershed management in northern semi-arid regions and similar mountainous small watersheds.

**Keywords:** stormwater resource utilization; modified SCS-CN model; rainfall; runoff; coupled surface water-groundwater model; groundwater flow field; underground reservoir

## 0 引言

通辽市嘎达苏种畜场作为我国第一批国家级重点种畜场,在我国畜牧业发展中占有极其重要的地位,其人畜饮水、农田灌溉水源主要来自地下水。而近些年来,随着生产、生活用水的增加,过度开采地下水使得研究区出现生态系统退化,水土流失、植被破坏等一系列问题,地下水环境的改变严重制约了嘎达苏畜牧业的可持续发展。同时,嘎达苏拥有林地自然保护区和古榆林示范基地,地下水资源也是维持保护区的基本因素之一<sup>[1-2]</sup>。为了解决该地区发展所面临的

小流域雨洪资源损失引发的地下水位持续降低的难题,从而实现“水、气、土、生、人”和谐发展,维持区域生态系统稳定,提升区域水土保持和水源涵养能力,有效降低区域水土流失、滑坡风险,改善区域生态环境,亟需开展山区小流域雨洪资源利用涵养地下水的示范工程。

雨洪资源利用包括雨水资源利用和洪水资源利用,雨水资源利用是指以小流域为基本单元,人工改变下垫面条件或采用小微型水量调节设施,对降雨及其形成的分散性坡面径流加以调控和处理,使之转化为适宜的经济社会和生态环境用水的过程;洪水资源

是指依托各类水利工程和洪水管理措施,在不突破流域洪水调控能力并保障河道内必要生态环境需水的前提下,通过对洪水期河网高水位、大流量的集中性径流采取调控、疏导和回补等措施,使之转化为适宜利用的经济社会和生态环境用水的过程,两者有效结合构成了雨洪资源利用<sup>[3]</sup>。近年来,国内外相关学者围绕雨洪资源利用进行了较为深入的研究,探究了如补给井人工补给地下水<sup>[4]</sup>、海绵城市雨水调蓄措施<sup>[5-6]</sup>,以及城市水网防洪<sup>[7]</sup>等途径实现雨洪资源利用;同时 AL-GHOBARI<sup>[8]</sup>、SHI<sup>[9]</sup>等还在研究中利用基于 GIS 的集成 MCDA 技术、SCS-CN 方法识别半干旱地区雨水收集的潜在区域;潘俊<sup>[10]</sup>等通过 Visual Modflow 软件建立三维水文地质概念模型预测不同工程方案对雨洪资源化的影响,最终采用可调控悬挂截渗坝代替普通截渗坝;王玮<sup>[11]</sup>利用无人机遥感影像数据,结合 GIS 空间分析,实现了江南景观生态水资源综合利用,并以此进行防涝景观设计;刘永等<sup>[12]</sup>基于秩次集对分析对城市雨洪资源利用潜力进行了研究;周燕等<sup>[13]</sup>从供需视角下全域尺度识别、规划县域雨洪调节关键区,这些研究为干旱区小流域雨洪资源利用提供了关键的研究思路和方法。虽然诸多学者<sup>[14-16]</sup>从不同角度对雨洪资源利用进行了分析和研究,但雨洪资源利用的应用范围和潜力仍处于发展阶段。目前的研究主要集中在农村和城市雨洪资源的高效利用,对于干旱区和半干旱区小流域综合治理中雨洪资源的高效利用的研究相对较少,系统化、全域方向的雨洪资源利用仍具有巨大的发展空间。小流域综合治理是山丘区有效开展水土保持的核心途径,它不仅是流域水土资源以及其他自然资源的开发、管理与利用研究的重要组成部分,也是当前国内外研究热点之一<sup>[17-18]</sup>。然而,却很少有学者研究小流域蓄滞洪区雨洪资源利用对上游地下水建设和流域水均衡状态的影响。

本文在分析通辽市区域雨水收集潜力的基础上,选取了扎鲁特旗嘎达苏小流域 1981—2023 年的区域降雨量和蒸发数据,利用修正 SCS-CN 模型预测了不同降雨频率产生的地表径流量。通过 P-III 曲线分析降雨频率,选取了 25%、50%、75% 降雨频率下的地表径流量代表值作为径流边界条件,构建了地表水-地下水耦合数值模型。该模型揭示了雨洪资源利用在涵养地下水过程中对上游地下水水流场的影响,并探讨了不同降雨频率对小流域地下水位埋深以及对蓄滞洪区主要水均衡要素的影响。研究结果为小流域雨洪资源利用涵养地下水工程参数设计提供了科学依据,为

国内小流域综合治理提供了理论技术支撑。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

小流域雨洪资源涵养工程位于通辽市扎鲁特旗鲁北镇正南方向 16 km,位于嘎达苏种畜场区内金厥山及古榆园南侧,巴乌线西侧,地理坐标范围为 44°19'11"N—44°32'17"N, 120°49'03"E—121°09'E,小流域面积 38.5 km<sup>2</sup>(见图 1),为典型的山洪侵蚀沟小流域。种畜场深居内陆,地处内蒙古高原边缘,距海较远,受海洋气候影响微弱,属温带大陆性季风气候,干旱半干旱草原地区,无河流经过。多年平均降雨量为 387.0~410.6 mm,降雨年内分布不均,主要集中在 6—9 月,降雨量 328.4 mm,占年降雨量的 84.9%<sup>[19]</sup>。全区多年平均气温为 6.4℃,蒸发强烈,致使土壤干燥,风蚀严重,极易引起土壤、草原沙化和退化,严重影响农牧业生产。

通过现场勘察钻探的方式获得了研究区的土层厚度和含水层系统(见图 2),钻孔深度内揭露的地层为:全新统风积层(Q<sub>4</sub><sup>col</sup>)、更新统坡积层(Q<sub>4</sub><sup>dl+pl</sup>)、侏罗系岩层(J<sup>h</sup>)。全新统风积层包括粉土和粉砂,层厚 0.9~7 m,主要分布在地表,沟渠两侧地表局部分布较薄粉质黏土;更新统坡积层包括中砂、砾砂和粉质黏土,层厚分别为 2.86 m、3.48 m 和 7.80 m;侏罗系岩层包括全风化、强风化、中风化凝灰岩和花岗岩,其中全风化花岗岩分布较广,平均厚度为 11.30 m,其他两类地层平均厚度分别为 1.00 m 和 3.38 m。钻探范围内未发现地下水,研究区主要地下水为承压水,地下水埋深在地表以下 80 m。

### 1.2 雨洪涵养工程措施

根据现场实际勘察,小流域第四系孔隙水含水层及底部基岩裂隙水(风化壳)具有一定的规模体量,但全年大部分时间处于无水状态,只在丰水月份形成地表径流渗入含水层空间,达到半饱和或全饱和状态。然而,由于地下水的水力坡度较大,这部分潜流水难以有效储存在含水层空间,这是该区域干旱或严重缺水的根本原因。通过人工干预手段快速将雨洪入渗到地下含水层,以形成具有一定调蓄能力的水资源保护、开发和利用的雨洪涵养工程,如图 3 所示。具体措施包括地下止水帷幕、地下辐射井、反滤层和集水层铺设等,假设底层中风化凝灰岩和花岗岩为不透水层,并利用上部土层作为潜水含水层来截取雨洪地表水。此外,通过在下游排泄口修建地下止水帷幕并进行部分换填,增强

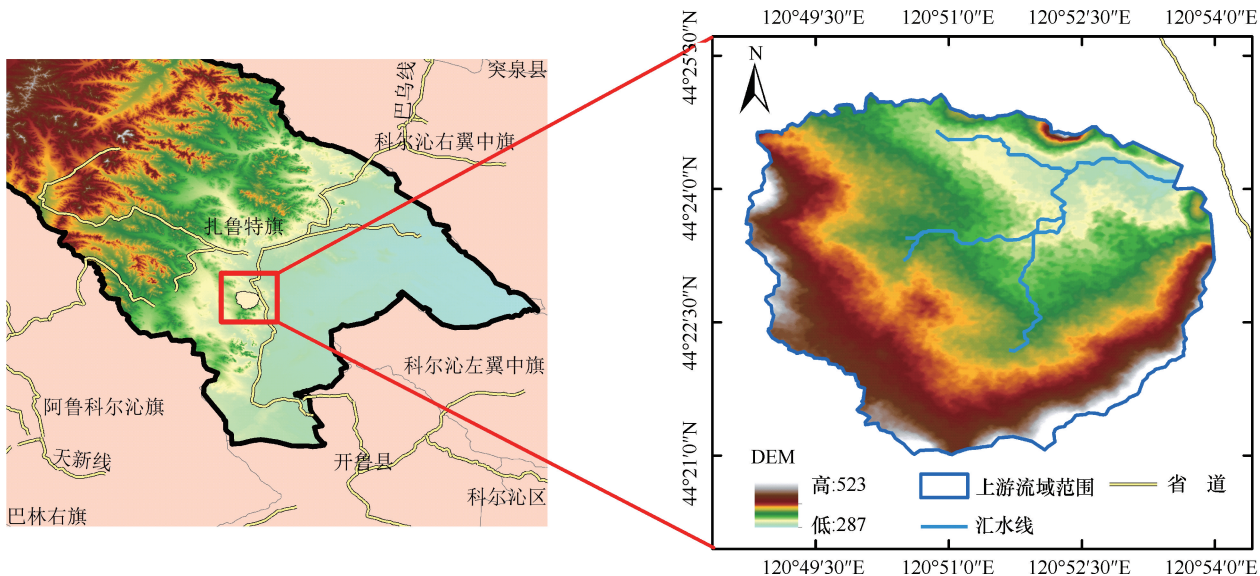


图 1 小流域综合治理区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of integrated small watershed management area

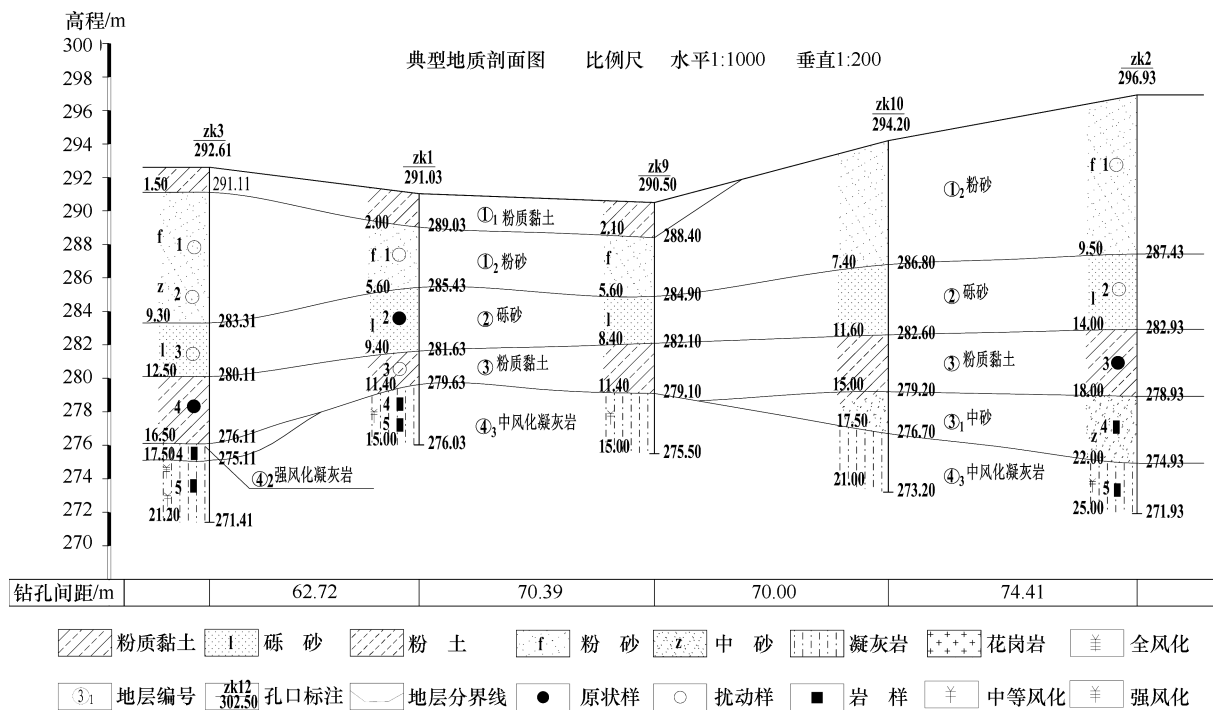


图 2 典型地质剖面

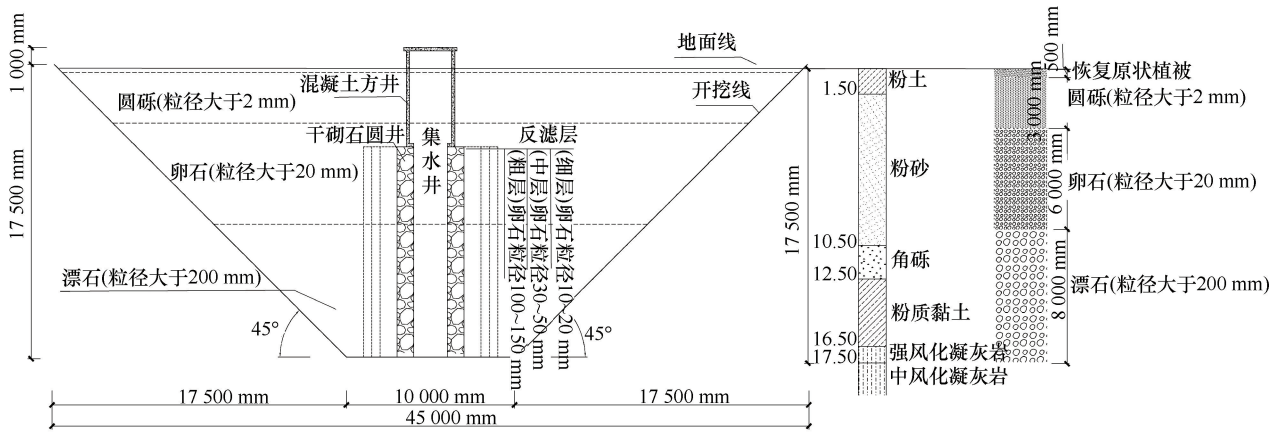
Fig. 2 Typical geological profile

地表径流的渗透速率, 从而提升研究区域整体地下水水位和蓄滞洪区地下含水量。

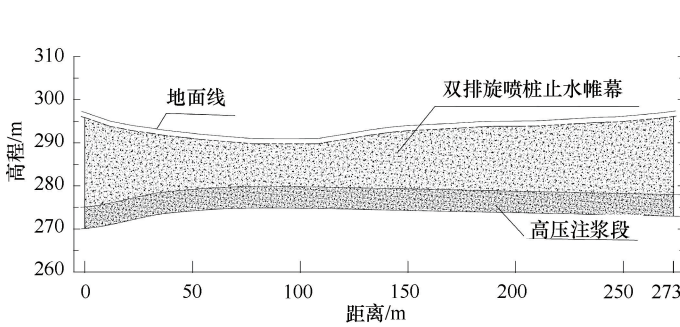
### 1.3 研究数据

12.5 m 数字高程数据 (Digital Elevation Model, DEM) 来源于美国地质调查局航天雷达地形勘测调查获得的流域地形图, 土壤物理力学性能参数来源于室内土工试验, 降雨数据来源于区域解析雨量和水文站

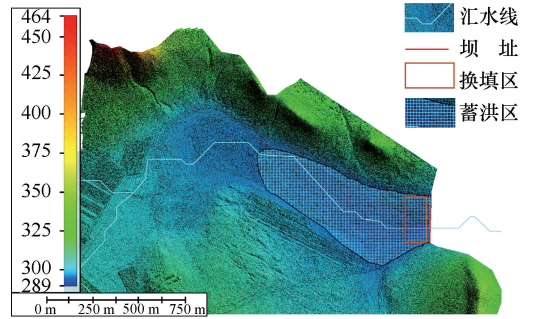
观测雨量, 蒸散发数据来源于 20 cm 的蒸发皿观测数据和区域解析数据。土地利用数据来源于国家用地类型一级用地标准<sup>[20]</sup>, 考虑到研究区实际地物分布与实地考察的真实性, 将该区域范围内的土地利用分为耕地、林地、旱地 (未利用地)、草地和湿地 5 种类型。草地占研究区土地利用类型的 95% 以上, 为主要土地利用类型 (见表 1、图 4)。



(a) 集水井横剖面



(b) 止水帷幕横剖面



(c) 雨洪涵养工程位置示意

图3 雨洪涵养工程示意

Fig. 3 Schematic diagram of stormwater conservation project

表1 土地利用类型

Table 1 Land use types

土地利用类型	覆盖描述	水文条件
耕地	直行排耕作物(农用地)	差
林地	树林(农用地)	好
旱地	直行排耕作物(农用地)	良
草地	连续草地(农用地)	好
湿地	灌木杂草混合区	差

## 2 研究方法

对研究区雨洪涵养工程可行性主要体现在不同降雨条件下预测地表径流和工程建设前后地下水位的动态变化等方面,雨洪涵养工程的建设直接影响小流域水文生态系统的稳定。

### 2.1 修正 SCS-CN 模型

SCS-CN 模型<sup>[21]</sup>是美国农业水土保持局于 1954 年开发的适用于小流域的集总式概念模型,模型基本理论为蓄满产流理论,采用唯一参数 CN 值来表示地形、土壤和植被因子的综合影响。SCS-CN 模型的基本原理如下

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, & P \geq I_a \\ 0, & P \leq I_a \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为地表径流量 (mm);  $P$  为总降雨量 (mm);  $S$  为潜在蓄水量 (mm);  $I_a$  为降雨初损值 (mm),  $I_a = \lambda S$ ;  $\lambda$  为初损率 ( $0 \leq \lambda \leq 0.5$ ), 取 0.2。

$S$  可通过 DESHMUKH<sup>[22]</sup> 等所提出的经验关系求得

$$S = \frac{25\ 400}{CN} - 254 \quad (2)$$

式中,  $CN$  为径流曲线系数。

$CN$  是反映降雨前流域特征的一个集成参数,它与坡度、植被覆盖类型、土壤的入渗能力、前期土壤湿润程度 (Antecedent Moisture Condition, AMC) 及土地利用等有关。 $CN$  值越大,  $S$  值越小, 越容易产生径流。前期土壤湿润程度 (AMC) 分为干旱 (AMC-I)、正常 (AMC-II)、湿润 (AMC-III), 对应的  $CN$  值为  $CN_1$ 、 $CN_2$ 、 $CN_3$ , 其相互转换公式为

$$\begin{cases} CN_1 = CN_2 - \frac{20 \times (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + e^{2.533 - 0.636 \times (100 - CN_2)}} \\ CN_3 = CN_2 \times e^{0.006\ 73 \times (100 - CN_2)} \end{cases} \quad (3)$$

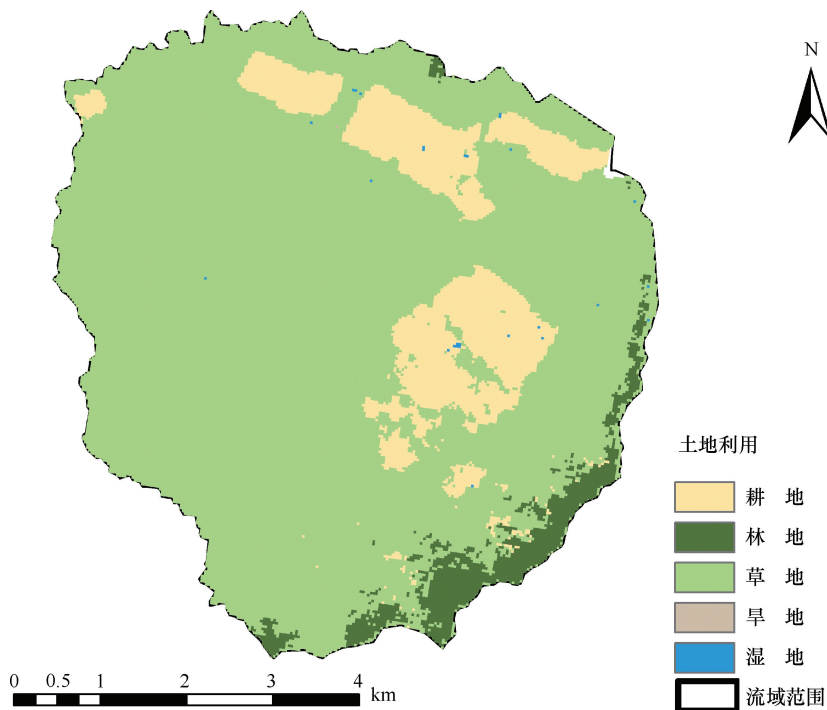


图4 研究区土地利用类型

Fig. 4 Land use types in the study area

SCS-CN 模型中降雨是产生地表径流的主要影响因素, 其真实性和对于地表径流的预测至关重要。根据研究区域的 shp 数据获得了 1981—2023 年 42 a 的日观测解析雨量, 与雨量站观测雨量进行拟合分析发现, 解析雨量与水文站观测雨量的月、季度和年降雨量的拟合系数  $R^2$  分别为 0.732、0.733 和 0.404 (见图 5)。

由图 5 可知, 月降雨量和季度降雨量值拟合性较好, 而年降雨量数据拟合性差。其原因在于雨量站距离研究区较远, 年降雨量数据存在较大不稳定性, 异常值较多, 难以反映研究区域的实际降雨情况。基于线性回归分析的结果, 研究采用区域解析雨量代替雨量站观测雨量作为模型降雨条件, 并采用皮尔逊三型 (P-III) 曲线适线法<sup>[23]</sup> 进行降雨频率分析 (见表 2)。降雨频率小于 25% 的年份为丰水年, 降雨频率在 25%~75% 之间的年份为平水年, 降雨频率大于 75% 的年份为枯水年, 降雨频率大于 95% 的年份为特枯水年。研究区年降雨量均值为 410.63 mm, 最大年降

雨量 (684.66 mm) 出现在 1993 年, 最小年降雨量 (296.08 mm) 出现在 2002 年, 极值比为 2.31 (见图 6)。

为了更好地评估研究区的地表径流潜力, 选取了 1981—2023 年的日降雨量、蒸发量数据作为研究对象, 将小流域划分为 4 个汇水单元。通过查找 CN 值检索表<sup>[24]</sup> 获取小流域不同土地利用类型对应的 CN 值, 并运用 GIS 软件对研究区的土壤类型和土地利用图层进行叠加, 生成水文土壤分组图层。基于该图层中的土地利用类型进行 CN 赋值, 随后通过对小流域内各汇水单元面积加权平均, 计算得到小流域加权 CN 值。经过面积加权后的 CN 值取值范围为 15.2~48.9, 干旱区初损率  $\lambda$  取 0.02<sup>[25]</sup>。最后, 采用修正 SCS-CN 模型计算 1981—2023 年的累积地表径流深度 (见图 7)。

如图 7 所示, 研究区域内年蒸发量较大, 很难形成径流, 只有短时强降雨才能产生径流。如 2017 年 7 月份的连续降雨产生了极大的径流峰值。然而,

表 2 不同频率降雨情况

Table 2 Rainfall conditions at different frequencies

名称	均值/mm	不同频率年降雨量/mm				最大/mm·a <sup>-1</sup>		最小/mm·a <sup>-1</sup>		极值比
		25%	50%	75%	95%	年降雨量	出现年份	年降雨量	出现年份	
模拟区	410.63	454.20	395.11	350.28	307.22	684.66	1993	296.08	2002	2.31

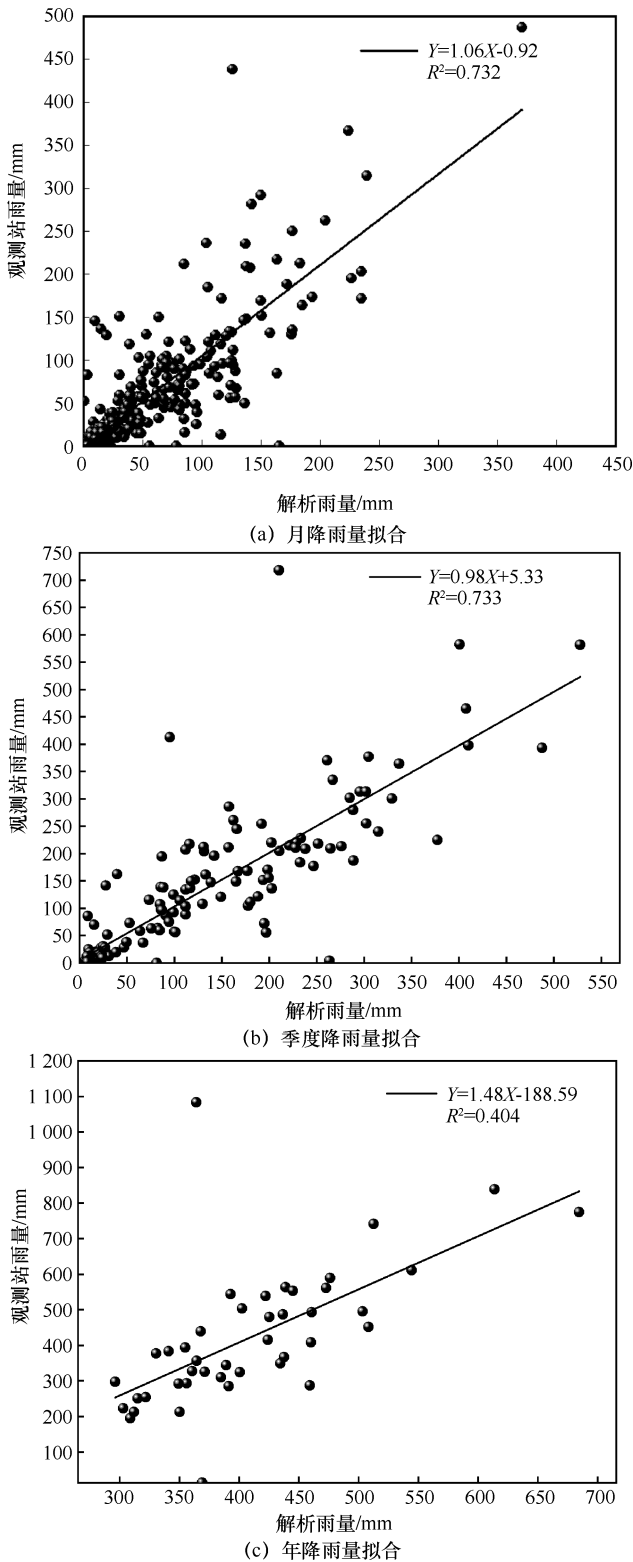


图5 区域解析雨量与观测站雨量对比

Fig. 5 Comparison of regional analytical rainfall data and rain gauge observations

由于年内降雨分布不均以及较高的蒸发量, 部分日期降雨未能形成径流。研究发现, 只有连续强降雨才能在该区域形成地表径流。

根据径流深度和流域面积计算得到 1981—2023 年累积径流量, 25%、50%、75%降雨频率下的年径流量分别为 110.26 万 m<sup>3</sup>、37.37 万 m<sup>3</sup> 和 22.89 万 m<sup>3</sup>, 水文比拟法计算的对应频率设计年径流量分别为 61.82 万 m<sup>3</sup>、31.78 万 m<sup>3</sup> 和 22.15 万 m<sup>3</sup>。模型计算得到的年径流量和水文比拟法设计年径流量基本一致, 但丰水年前者计算结果大于后者许多, 其原因在于选取的丰水年 7、8 月降雨比较集中, 产生了极大的径流峰值。研究表明, 修正后的 SCS-CN 模型能够准确计算嘎达苏小流域降雨产生的地表径流量, 同时满足雨洪资源利用的要求。基于此, 可以通过拦截工程拦截地表径流补给潜水含水层地下水, 从而建设地下水库, 实现地下水资源的可持续利用。

### 2.2 地下水数学模型

基于地质勘探结果及其 MODFLOW 概念模型可知, 研究区为各向同性、非均质、准三维非稳定地下水系统, 可用微分方程的定解问题来描述<sup>[26-27]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x (h - a) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y (h - a) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z (h - a) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \omega = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \\ K_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 + p = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x, y, z) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z) \\ K_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $h$  为潜水层水位 (m);  $a$  为潜水含水层底板标高 (m);  $k$  为潜水含水层渗透系数 (m/d);  $K_n$  为边界法向渗透系数 (m/d);  $S_s$  为含水层贮水系数 (1/m);  $\mu$  为潜水含水层在潜水面上的重力给水度 (1/m);  $\omega$  为含水层的源汇项 (m/d);  $p$  为潜水面的蒸发和降雨等 (m/d);  $\Gamma_1$  为渗流区域的水位边界;  $\Gamma_2$  为渗流区域的流量边界;  $n$  为边界面的法线方向;  $q(x, y, z)$  定义为二类边界的单宽流量 (m<sup>2</sup>/d/m), 流入为正, 流出为负, 隔水边界为 0。

### 2.3 地表水-地下水耦合模型

在 MODFLOW 概念模型中, 降雨入渗补给量和上游山前侧向补给量常采用 RCH 子程序包和井 (WELL) 的形式代入模型进行计算。然而, 该方法缺少对陆面水流状态和流量的详细描述, 且未考虑下垫面等条件, 同时, SCS-CN 模型忽略了含水层的复杂结构等问题<sup>[28-29]</sup>。因此, 本文通过切换 MODFLOW 模型边界条件的方式, 将地表水和地下水联系起来, 以提高模型的整体适用性和准确性。应用 SCS-CN 模

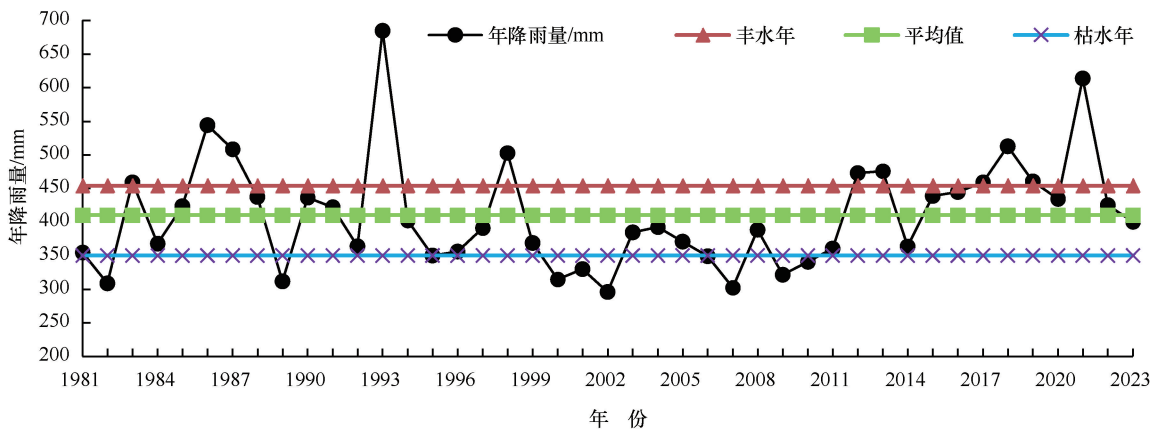


图6 近42年降雨量丰、平、枯变化情况

Fig. 6 Variations in wet, normal, and dry rainfall conditions over the past 42 years

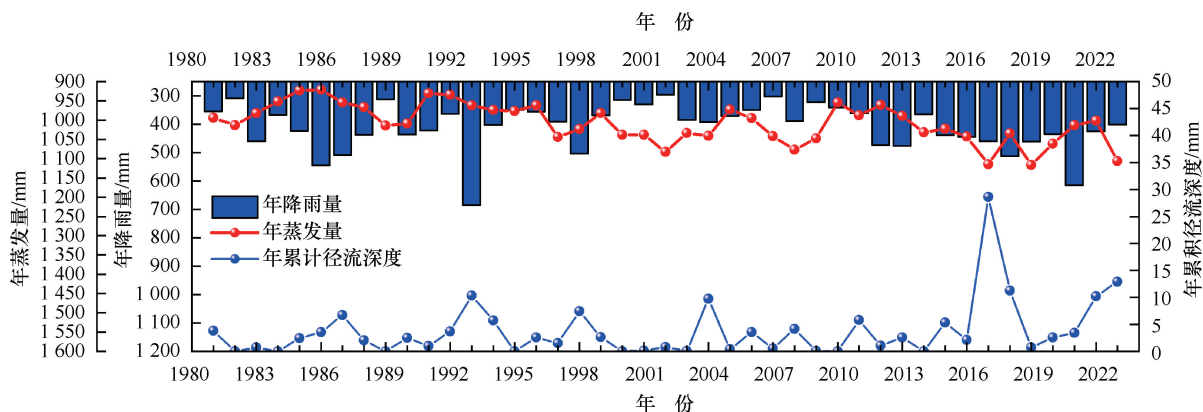


图7 1981—2023年降雨量和累积径流深度

Fig. 7 Annual rainfall and cumulative runoff depth (1981—2023)

型中计算得到的地表径流量替代 MODFLOW 模型中上游山前侧向补给量, 并选用优化后 STR 子程序包代替井(WELL)作为地表径流补给项引入模型; 应用 SCS-CN 模型中计算得到的潜在蓄水量  $S$  替代 MODFLOW 模型中的降雨入渗补给量, 以 RCH 面状补给的形式引入模型, 从而建立基于 MODFLOW 边界条件法的地表水-地下水耦合模型, 便于刻画地下水系统复杂的非均质结构以及边界条件。模型的具体建立方法如图 8 所示。

### 3 地表水-地下水耦合数值模拟

#### 3.1 模型土层概化

为了提高数值模拟的计算效率, 对勘探土层进行合理概化, 结果如图 9 所示。将钻孔深度内揭露的地层数据概化为四层单一结构; 模拟区地下水走向为西南流向东北排泄口, 为单一结构潜水含水层; 地表主要分布的是大厚度的粉砂土层, 厚约 20 m, 其中上部为第四系全新统冲洪积层, 下部为侏罗系玛尼吐组

中酸性全风化凝灰岩、花岗岩, 不透水层为白垩系上统安山岩和白垩系中统凝灰岩, 厚度 20~80 m, 与上覆第四系呈不整合接触。研究区地层分布存在一定的非均质性, 但不同方向的渗透性差异较小, 因而将第四系全新统土层含水介质、侏罗系全风化岩石均概化为非均质各向同性。

#### 3.2 模型识别与校正

模拟区上游东侧、南侧、北侧均为侧向流入边界, 东北侧排泄口为侧向流出边界; 上边界为潜水面, 底边界为白垩系上统安山岩和白垩系中统凝灰岩底板。地下水径流迟缓, 与下部基岩底板间的地下水交换微弱。根据实地勘察, 研究区含水层为潜水含水层, 第四系含水层分布较广, 地下水位具有时空上的不均匀性, 故将地下水流动概化为三维非稳定地下水系统。

降雨作为研究区域地下水补给的主要来源, 本研究采用区域解析雨量代替雨量站观测雨量。根据模拟区的 5 种土地利用类型, 分区输入相应的降雨入渗补

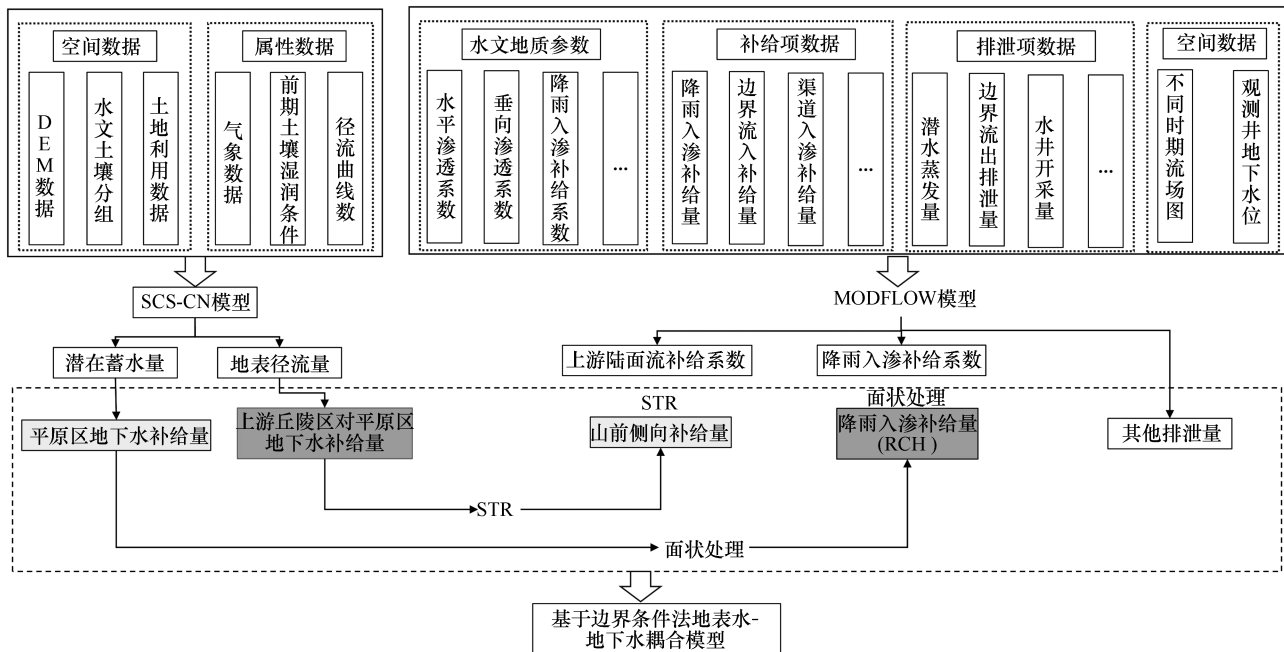


图 8 地表水-地下水耦合模型建立流程

Fig. 8 Establishment process of coupled surface water-groundwater model

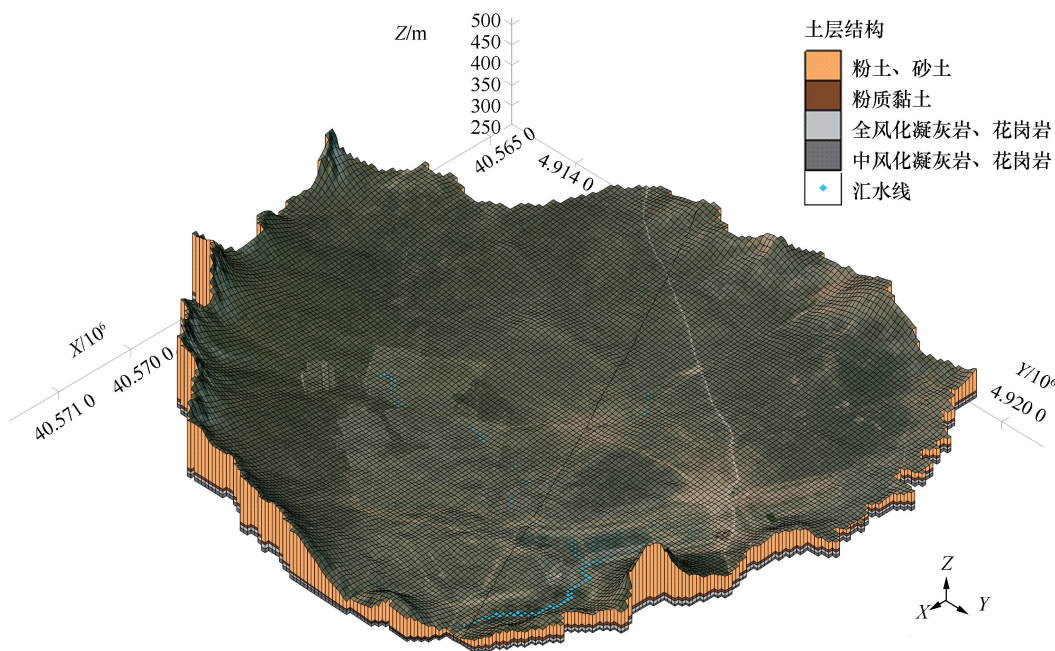


图 9 三维地质概念模型

Fig. 9 Three-dimensional geological conceptual model

给系数, 同时最大蒸发速率采用分区折算后的蒸发速率。蒸发的极限深度根据土地利用类型不同有所差异, 依据前人的研究结果, 得出了各分区的极限蒸发深度。模拟区水文地质参数赋值如表 3 所列, 地面高程源自 12.5 m DEM 数据, 渗透系数、给水度和贮水率来源于现场勘探取样、室内土工试验。

将三维地质概念模型转换为离散网格, 建立初始的稳定地下水模型, 模拟期设置为 2020 年地下水流场。土层参数通过插值层数据自动分配到每个单元格, 补给和排泄数据则通过区域概念模型方式引入到模型表面。然后, 基于模拟区含水层特征和民用井地下水位观测数据, 并结合水文地质构造图, 设定初始

表3 不同土层物理力学性能参数

Table 3 Physical and mechanical properties of different soil layers

土层结构	渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$		给水度 $/m^{-1}$	贮水率 $/m^{-1}$
	水平	垂直		
粉土、砂土	30.000 00	5.000 00	0.161	0.000 450
粉质黏土	0.020 00	0.007 00	0.030	0.002 600
全风化岩石	50.000 00	10.000 00	0.200	0.000 036
中风化岩石	0.000 28	0.000 28	0.210	0.000 002

现状地下水位。

通过 PEST 子程序包的试点法进行多次模拟、调参、优选, 对计算水位进行参数反演分析, 最终得到了一个校准后的模型, 作为初始地下水流场。模型校准和验证结果如图 10 所示。校准目标具有 95% 的置信区间, 水头误差间隔为 0.5 m, 其中 10 个目标在误差范围内, 误差条呈绿色, 3 个目标在范围之外, 但误差小于 200%, 误差条呈黄色。大部分校准目标误差条在中间观测值上方, 表明计算水位高于设定现状地下水位, 但整体误差在允许范围以内。勘探孔观测值与模拟计算值平均绝对误差为 0.41 m, 平均相对误差为 0.13 cm, 平均纳什效率系数 (NSE) 为 0.97, 拟合系数  $R^2$  为 0.998。

从图 10 可以推断, 潜水含水层地下水流向为东南向, 从东北排泄口坝址位置流出模拟区域。根据研究区实地考察, 地下水的主要来源是降雨产生的侧向地表径流补给, 渠道渗透对地下水的贡献微不足道, 可以忽略不计。

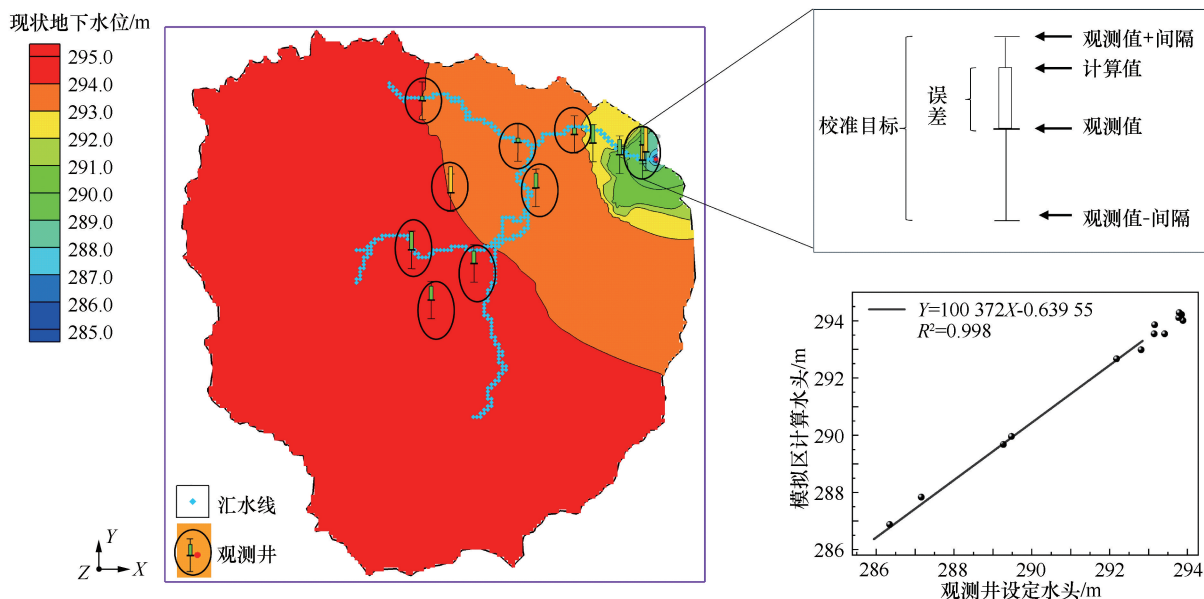


图 10 模型校准和验证

Fig. 10 Model calibration and validation

## 4 结果与分析

### 4.1 不同工况地下水流场对比

为了有代表性的研究雨洪资源收集对地下水流场的影响, 选取了 2017 年 (丰水年)、2004 年 (平水年)、2011 年 (枯水年) 共 1095 d 的日降雨数据和地表径流数据。以校准后的稳定地下水流场为初始地下水流场, 进行非稳定流地下水位数值模拟。应力期为 1 a, 每个应力期为 12 个月, 计算的时间步长为 30 d。在每个应力期内, 所有外部源汇项的强度保持不变。地下水流场分布曲线未出现较大变化, 但模拟区内地下水位高度变化较为明显, 具体而言, 2017 年地下水位稳定抬升了 1.81 m, 2004 稳定抬升了 1.64 m, 2011 稳定抬升了 1.53 m (见图 11、图 12)。模拟区 2011 年设计年地下水位能够抬升至 2017 年现状年地下水位高度。这一抬升高度表明, 小流域能够通过雨洪资源涵养的方式有效补给地下水资源, 从而改善小流域内的生态系统、土壤结构和植被等方面的破坏问题。

由于库区地质条件复杂, 本文从小流域四个方位角中各选取一个单元, 对雨洪涵养工程建设前后模拟区地下水位变化进行了评估, 旨在准确预测工程建设后地下水资源量的变化情况。研究区工程建设前后地下水位对比情况如表 4 所列。模拟区丰水年降雨入渗量大, 初始地下水位较高, 在工程区潜水含水层达到饱和后, 多余的地下水通过第一层透水坝流出模拟区。而在枯水年, 由于降雨入渗量

小, 初始地下水位较低, 通过拦蓄地表径流涵养地下水的方式, 能够使模拟区地下水位抬升到丰水年现状地下水位高度。

不同水平年蓄滞洪区地下水位抬升高度最大, 其地下水补给的主要来源是丰水季(7、8月份)的地表径流, 同时模拟区生态环境脆弱易受到地下水波动的影响, 故需对地下水库蓄滞洪区的调蓄量进行计算。

#### 4.2 地下水库蓄滞洪区调蓄水量

模拟区无河流经过、地下水位较深、潜水层区域地下水存量稀少且区域内通过工程措施拦渗地表径流

进行水源涵养, 地表水和地下水交换微弱, 可以忽略不计, 故主要计算蓄滞洪区不同工况下地下水储变量的情况。根据模拟工程建设不同水平年前后现状年和设计年的地下水流场分布结果, 计算蓄滞洪区的地下水储变量。不同丰、平、枯现状年和设计年研究区地下水均衡对比如表 5 所列。蓄滞洪区不同水平年的地下水储变量分别为 40.88 万  $m^3$ 、23.45 万  $m^3$  和 20.48 万  $m^3$ , 相对变化率分别为 7.60、6.00 和 5.32, 与地下水库调蓄库容概念计算得到的最大库容 33.44 万  $m^3$ 、最小库容 21.28 万  $m^3$  相比差距不大, 模拟结果可以反映实际蓄滞洪区水资源储变量情况。

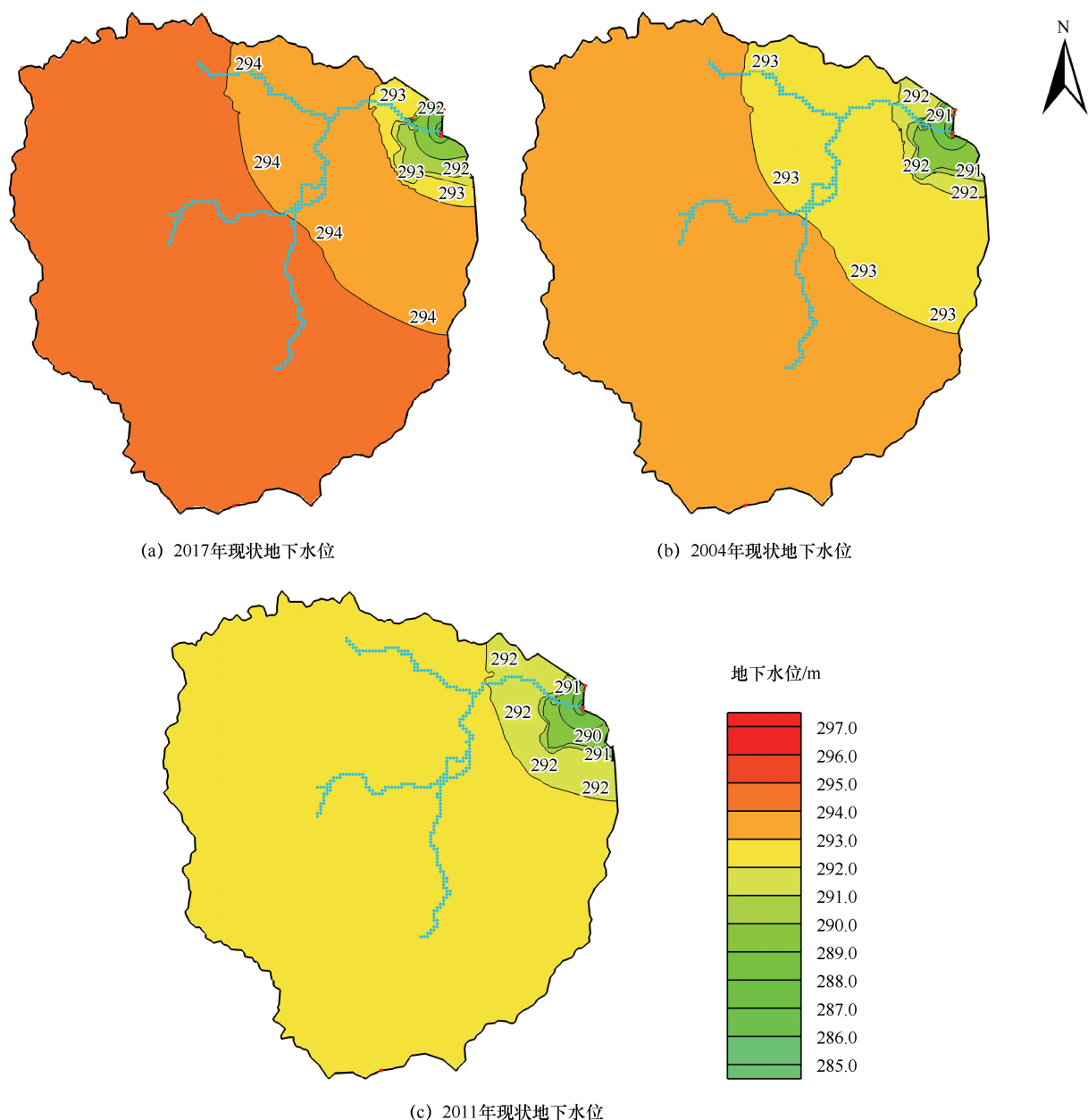


图 11 现状年地下水位流场

Fig. 11 Groundwater level flow field in baseline years

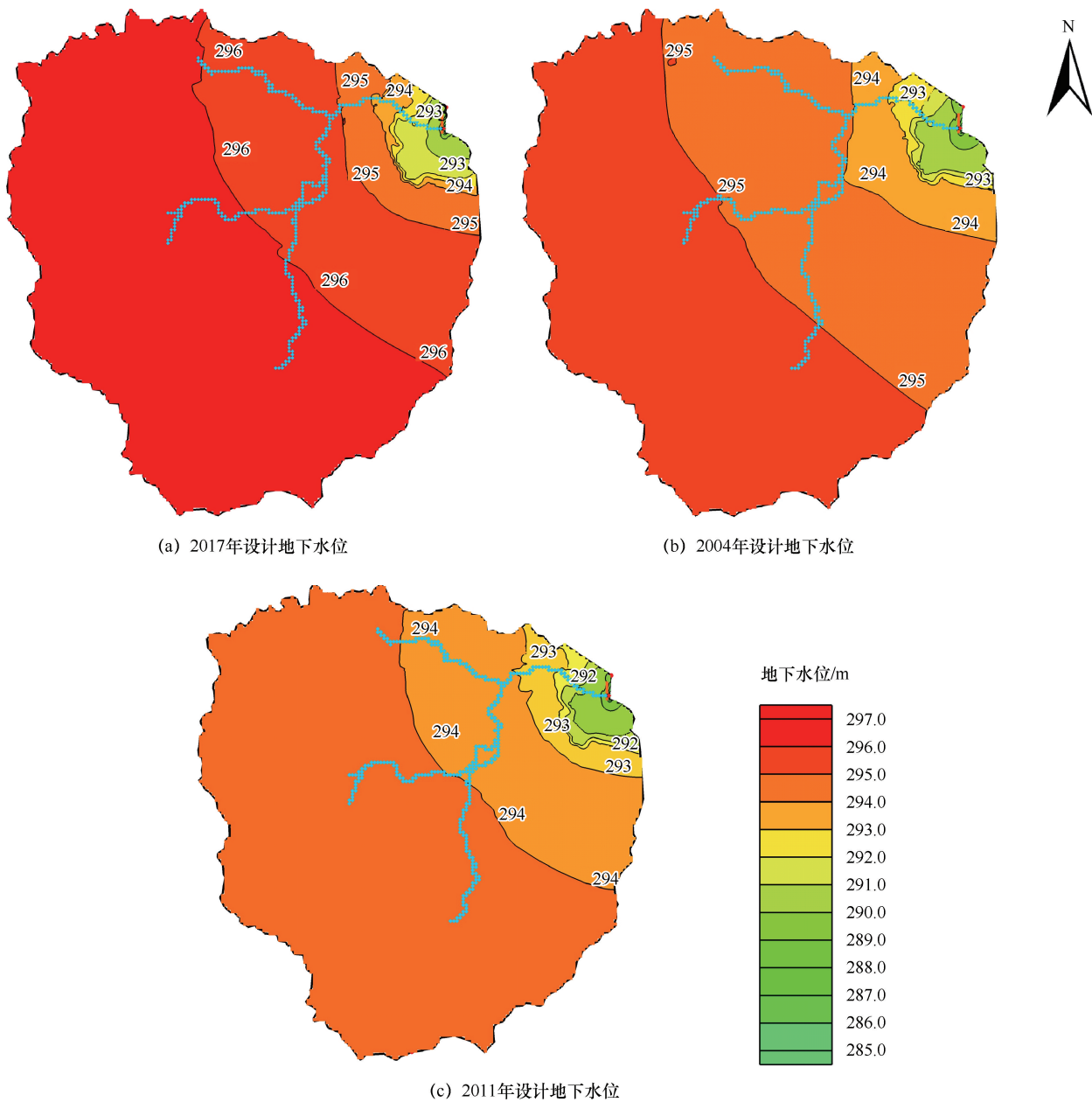


图 12 设计年地下水位流场

Fig. 12 Groundwater level flow field in design years

表 4 研究区工程建设前后地下水位对比

Table 4 Comparison of groundwater levels before and after project implementation in the study area

年 份	水平年	单元 1(蓄滞洪区)	单元 2(农村宅基地)	单元 3(田地)	单元 4(林地)
2017	现状年	288.69	294.23	293.92	294.31
	设计年	292.53	296.13	295.49	296.30
	水位差	3.84	1.90	1.57	1.99
2004	现状年	288.23	293.20	292.95	293.27
	设计年	289.91	294.90	294.39	295.03
	水位差	1.68	1.70	1.44	1.76
2011	现状年	288.00	292.67	292.45	292.73
	设计年	290.11	294.28	293.72	294.44
	水位差	2.11	1.61	1.27	1.71

表5 不同丰、平、枯现状年和设计年研究区地下水均衡对比

m<sup>3</sup>

Table 5 Comparison of groundwater balance in the study area under wet, normal, and dry conditions for baseline

and design years

m<sup>3</sup>

年份	水平年	总补给	总排泄	降雨入渗	潜水蒸发	储变量
2017	现状年	349 920.00	296 105.40	284 152.50	310 943.50	53 814.60
	设计年	813 161.55	350 545.80	428 780.35	351 568.00	462 615.75
	变化量	463 241.55	54 440.40	144 627.85	40 624.50	408 801.15
	变化率	1.32	0.18	0.51	0.13	7.60
2004	现状年	295 098.00	255 994.20	248 054.00	250 937.50	39 103.80
	设计年	568 794.93	295 171.20	379170.82	303 570.50	273 623.73
	变化量	273 696.93	39 177.00	131116.82	52 633.00	234 519.93
	变化率	0.93	0.15	0.53	0.21	6.00
2011	现状年	268 461.60	229 981.20	225 497.00	226 628.50	38 480.40
	设计年	518 559.00	275 270.40	347 826.30	292 219.00	243 288.60
	变化量	250 097.40	45 289.20	122 329.30	65 590.50	204 808.20
	变化率	0.93	0.20	0.54	0.29	5.32

可见,雨水涵养工程建立之后,地下水补给年变化量呈几何倍数增加,变化幅度也相应增长。

不同水平年由于受到集水层铺装和地下水帷幕收集拦蓄地表径流不同的控制,其引起的地下水资源量的变化量和变化程度不同,影响效应也不同。整体而言,各项水均衡要素呈现出基本一致的“递增”变化趋势。由表5可知,雨水涵养工程的建立使得绝大部分地表径流入渗补给地下水,其中不同水平年蓄滞洪区拦截地表径流补给量分别为46.32万m<sup>3</sup>、27.37万m<sup>3</sup>和25万m<sup>3</sup>,分别占总径流量的41.9%、73.2%和109.15%,排泄变化量分别为5.44万m<sup>3</sup>、3.92万m<sup>3</sup>和4.53万m<sup>3</sup>,相应的变化率分别为18%、15%和20%。结果表明,雨洪涵养工程建设后,枯水年降雨产生的地表径流几乎全部被拦截补给地下水,而丰水年降雨产生的地表径流较多,蓄滞洪区地下水达到饱和之后,多余的水会从第一层透水坝流向下游,对下游的生态环境和水资源影响较弱。

## 5 结果讨论

在小流域综合治理研究过程中,雨洪资源补给地下水潜力评估是干旱区、半干旱区控制水土流失、改善生态环境和雨洪资源调配的关键,对研究区经济发展、自然生态修复至关重要。目前研究多采用SWAT-MODFLOW半松散耦合模型<sup>[30-33]</sup>,该模型适用于土壤数据易获取、观测站距离研究区较近且有河流经过的大型流域,用来分析地表水-地下水转换关系和地下水均衡量。然而,对于土壤信息匮乏、无河流经过且亟需综合治理的农业小流域,其适用性较差。相比之下,利用修正SCS-CN模型<sup>[34-35]</sup>代替SWAT模型,既可以较好地预测无测量数据的农业小

流域地表径流,同时又扩大了模型的应用范围<sup>[36]</sup>。此外,通过切换边界条件法构建的地表及地下水耦合模型综合考虑了模拟区水文土壤分组、土地利用和前期湿润条件的影响。其模拟结果与潘俊<sup>[10]</sup>相似区域研究结果相符,即小流域通过雨洪涵养工程拦渗补给地下水,雨洪资源利用率可提高至20%,且雨洪资源入渗量为天然条件下雨洪资源入渗量100倍以上,有效缓解了因雨洪资源损失导致的水土流失、生态破坏和水资源短缺的问题。虽然本文在小流域综合治理研究方面取得了一些阶段性成果,但仍存在一定的不足,未来的研究还可以从以下几个方面进行修正和完善。

(1)本文在进行降雨地表径流预测时,仅考虑了前5d降雨量和初损率对地表径流的影响,而地表径流量的预测还可能与降雨历时、降雨强度、天然土壤含水量以及天然土壤颗粒松散程度等因素存在一定联系,未来研究应进一步探讨上述不同影响因素对地表径流的影响,提高小流域预测精度。

(2)模拟区雨洪涵养工程通过潜水含水层蓄积雨洪资源涵养地下水,为了工程应用的可行性,研究过程中重点研究了拦渗地表径流对潜水含水层水位流场变化的影响,弱化了上游壤中流。未来研究可细化地下水库补给的途径,分析不同补给途径对地下水水位的影响,并结合土壤物理特征与流域地形条件进行多维度地下水涵养量分析。

(3)小流域综合治理是一个系统的研究过程,涉及多因素交互作用,包括植被截留、水文生态修复、高标准农田灌溉、社会经济效益及下游生态影响等。未来研究将进一步探讨上游库坝工程对下游地下水水位的影响,以便更全面评估雨洪资源利用在小流域综合治理中的可行性。

## 6 结 论

为探究嘎达苏小流域收集利用雨洪资源涵养地下水位实现综合治理的可行性, 本文修正 SCS-CN 模型预测降雨产生的地表径流, 并将预测结果作为边界条件代入地下水模型, 构建基于边界条件法的耦合模型, 以开展蓄滞洪区收集雨洪资源潜力研究。通过耦合模型, 探讨不同降雨保证率工况下雨洪涵养工程对上游地下水水位的影响, 进行蓄滞洪区调蓄水量计算, 并绘制地下水水位流场图。

(1) 采用区域解析雨量代替雨量站观测雨量, 利用修正后的 SCS-CN 模型预测嘎达苏小流域降雨产生的地表径流, 结果表明 1981—2023 年降雨产生的地表径流量最大为 110.26 万  $\text{m}^3$ 、平均为 14.54 万  $\text{m}^3$ , 不同降雨保证率产生的地表径流量分别为 110.26 万  $\text{m}^3$ 、37.37 万  $\text{m}^3$  和 22.89 万  $\text{m}^3$  与水文比拟法计算结果误差较小, 满足雨洪资源利用的条件。

(2) 基于边界条件法构建地表水—地下水耦合模型, 并结合观测井和民用井实测水位, 对模型进行识别验证。结果显示 10 个校准目标绝对误差在 0.5 m 范围内, 3 个校准目标绝对误差平均值为 0.63 m, 但误差小于 200%, 模拟效果较好。雨洪涵养工程建设后, 不同工况下上游设计地下水位均高于现状地下水位, 分别稳定抬升了 1.81 m、1.64 m 和 1.53 m, 其中蓄滞洪区抬升高度最高, 平均抬升 2.54 m。

(3) 蓄滞洪区不同水平年的地下水储变量分别为 40.88 万  $\text{m}^3$ 、23.45 万  $\text{m}^3$  和 20.48 万  $\text{m}^3$ , 占总径流量的 37.1%、62.8% 和 89.5%, 排泄变化量分别为 5.44 万  $\text{m}^3$ 、3.92 万  $\text{m}^3$  和 4.53 万  $\text{m}^3$ , 相应的变化率分别为 0.18、0.15 和 0.20。结果表明, 雨洪涵养工程有效避免了汛期洪水灾害, 同时稳定抬升上游地下水位, 验证了半干旱区地下水调节汛期雨洪、促进以丰补枯的可行性。

## 参考文献 (References):

[1] 包塔娜. 乡村振兴战略下的畜牧业市场化进程研究: 以通辽市嘎达苏种畜场为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.  
BAO T N. Research on the Marketization Process of Animal Husbandry under the Strategy of Rural Revitalization [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.

[2] 谢艾楠, 关雪, 苗添升. 西辽河“量水而行”方案下通辽市用水思考[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 112-116.  
XIE A N, GUAN X, MIAO T S. Thoughts about water use of Tongliao City under the scheme of “carrying out program by measuring

water” of xiliaohe river [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9): 112-116.

[3] 胡庆芳, 王银堂, 邓鹏鑫, 等. 对雨洪资源利用的再认识[J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 149-160.  
HU Q F, WANG Y T, DENG P X, et al. Reunderstanding on rain and flood resources utilization [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 149-160.

[4] HUSSAIN F, HUSSAIN R, WU R S, et al. Rainwater harvesting potential and utilization for artificial recharge of groundwater using recharge wells [J]. Processes, 2019, 7(9): 623.

[5] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 典型 LID 设施降雨径流调控效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 61-75.  
LIAO R T, XU Z X, YE C L, et al. Study on the runoff regulation effects of low impact development facilities [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 61-75.

[6] LI W T, WANG H, ZHOU J J, et al. Simulation and evaluation of rainwater runoff control, collection, and utilization for sponge city reconstruction in an urban residential community [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12372.

[7] 刘正疆, 张浩, 马丽娜, 等. 城市地表雨洪特征的数值模拟研究(英文) [J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 46-57.  
LIU Z J, CHO H S, MA L N, et al. Numerical study of surface water flooding characteristics in urban environments [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 46-57.

[8] AL-GHOBARI H, DEWIDAR A Z. Integrating GIS-based MCDA techniques and the SCS-CN method for identifying potential zones for rainwater harvesting in a semi-arid area [J]. Water, 2021, 13(5): 704.

[9] SHI Z H, CHEN L D, FANG N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2009, 77(1): 1-7.

[10] 潘俊, 滕炳麓. 干旱地区雨槽暗蓄雨洪资源化利用模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 945-951.  
PAN J, TENG B L. Simulation of stormwater reclamation in underground water storage space of river channel in arid area [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024, 40(5): 945-951.

[11] 王玮, 王浩, 李卫正, 等. 基于小型无人机摄影测量的江南景观水资源综合利用分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 7-14.  
WANG W, WANG H, LI W Z, et al. Analysis on comprehensive utilization of landscape water resources based on UAV digital photogrammetry technology [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(1): 7-14.

[12] 刘永, 马飞, 董小花, 等. 基于集对分析的德州市雨洪资源潜力

- 研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 310-313.
- LIU Y, MA F, DONG X H, et al. Research on the potential of rainfall and flood resources on set pair analysis in Dezhou City[J]. Journal of Shandong Agricultural University ( Natural Science Edition), 2022, 53(2): 310-313.
- [13] 周燕, 祁梦园, 邱孝高, 等. 供需视角下雨洪调节关键区识别及规划策略研究[J]. 人民长江, 2024, 55(3): 42-51.
- ZHOU Y, QI M Y, QIU X G, et al. Identification and planning strategy of rainfall and flood regulation key areas from supply and demand view[J]. Yangtze River, 2024, 55(3): 42-51.
- [14] TAMAGNONE P, COMINO E, ROSSO M. Rainwater harvesting techniques as an adaptation strategy for flood mitigation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124880.
- [15] ZHANG X Y, LI F W, YUAN X M. Assessment model of rainwater resource utilization and influencing factors in arid and semiarid areas [J]. Natural Resource Modeling, 2023, 36(2): e12366.
- [16] KIM J, FURUMAI H. Assessment of rainwater availability by building type and water use through GIS-based scenario analysis[J]. Water Resources Management, 2012, 26(6): 1499-1511.
- [17] DOOST Z H, ALSUWAIYAN M, YASEEN Z M. Runoff management based water harvesting for better water resources sustainability: A comprehensive review [ J ]. Knowledge-Based Engineering and Sciences, 2024, 5(1): 1-45.
- [18] YAO J P, WANG G Q, JIANG X M, et al. Exploring the spatiotemporal variations in regional rainwater harvesting potential resilience and actual available rainwater using a proposed method framework [ J ]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 160005.
- [19] 王之晟, 马国祥, 卢天军, 等. 内蒙古扎鲁特旗嘎达苏早三叠世 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(9): 1722-1730.
- WANG Z S, MA G X, LU T J, et al. The discovery of the Early Triassic A-type granite in Gadasu, Jarud Banner, Inner Mongolia, and its geological significance [ J ]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(9): 1722-1730.
- [20] JAAFAR H H, AHMAD F A, EL BEYROUTHY N. GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design[J]. Scientific Data, 2019, 6: 145.
- [21] EL-BAGOURY H, GAD A. Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS[J]. Water, 2024, 16(2): 356.
- [22] DESHMUKH D S, CHAUBE U C, EKUBE HAILU A, et al. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope [J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 89-101.
- [23] 雷冠军, 王文川, 殷峻暹, 等. P-III型曲线参数估计方法研究综述[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 1-7.
- LEI G J, WANG W C, YIN J X, et al. Review on study of parameter estimation method on P-III curve[J]. Yellow River, 2017, 39(10): 1-7.
- [24] MISHRA S K, SINGH V P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology [ M ]. Springer Science & Business Media, 2013: 90-103.
- [25] XIAO B, WANG Q H, FAN J, et al. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 738-749.
- [26] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 79-111.
- XUE Y Q, XIE C H. Numerical Simulation for Groundwater [ M ]. Beijing: Science Press, 2007: 79-111.
- [27] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学 [ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 4-43.
- WU J C, XUE Y Q. Underground Hydrodynamics [ M ]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 4-43.
- [28] 邵嘉佳, 李彬权, 孟健, 等. 山区小流域 SCS 广义单位线产汇流模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 618-624.
- SHAO J J, LI B Q, MENG J, et al. Runoff generation and confluence model coupling SCS-CN and general unit hydrograph for small mountainous watersheds [ J ]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 618-624.
- [29] 朱金峰, 刘悦忆, 章树安, 等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3002-3010.
- ZHU J F, LIU Y Y, ZHANG S A, et al. Review on the research of surface water and groundwater interactions [ J ]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3002-3010.
- [30] LI M Y, XIE Y Q, DONG Y H, et al. Review: Recent progress on groundwater recharge research in arid and semiarid areas of China [J]. Hydrogeology Journal, 2024, 32(1): 9-30.
- [31] 王子尧, 左其亭, 巴音吉, 等. 基于 SWAT 和 STIRPAT 模型的沁河流域生态基流保障及人为影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1119-1128.
- WANG Z Y, ZUO Q T, BA Y J, et al. Ecological base flow guarantee and human influencing factors in Qinhe River basin based on SWAT and STIRPAT models[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1119-1128.
- [32] 傅笛, 金鑫, 金彦香, 等. 基于 SWAT-MODFLOW 耦合模型的巴音河中泽令沟盆地地表水-地下水转换关系研究[J]. 地理科学, 2022, 42(6): 1124-1132.
- FU D, JIN X, JIN Y X, et al. Modelling of the surface-ground water

exchange yield in zelingou basin, middle reaches of the bayin river based on SWAT-MODFLOW coupled model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(6): 1124-1132.

[33] SALMANI H, JAVADI S, EINI M R, et al. Compilation simulation of surface water and groundwater resources using the SWAT-MODFLOW model for a karstic basin in Iran [J]. *Hydrogeology Journal*, 2023, 31(3): 571-587.

[34] 梁峰铭, 王洁, 蒿萌, 等. 不同土壤湿度和雨强下径流曲线模型的改进[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(1): 52-64.

LIANG F M, WANG J, HAO M, et al. Improvement of Soil Conservation Service Curve Number model under different antecedent

moisture conditions and rainfall intensities [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(1): 52-64.

[35] BAIAMONTE G. SCS curve number and green-Ampt infiltration models[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2019, 24(10): 04019034.

[36] BECK H E, DE JEU R A M, SCHELLEKENS J, et al. Improving curve number based storm runoff estimates using soil moisture proxies [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(4): 250-259.

(责任编辑 王璐)