

北京西部典型地下水回灌区域水量平衡分析

杨谦雪^{1,2}, 王 韬^{2,3*}, 古 玉^{2,3}, 龚雨薇^{2,3}, 樊正龙^{2,3}

¹中央民族大学生命与环境科学学院, 北京

²北京师范大学水科学研究院, 北京

³城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2025年9月9日; 录用日期: 2025年10月3日; 发布日期: 2025年10月30日

摘 要

人工回灌是恢复地下水采补平衡、缓解水资源短缺及增强地表水与地下水联动的重要手段。本研究以北京市西郊典型砂石坑为对象, 结合三维数字孪生体构建方法, 建立水位库容关系和水量平衡模型, 定量分析人工回灌和下渗过程。结果表明: 降水和人工补给为研究区的主要入流来源; 渗漏为主要的耗水途径, 且随着水位增加渗漏量显著增加; 入流和耗水过程受降水及人工回灌影响, 呈阶段性波动。三维数字孪生体、水量平衡模型和水位、矩形堰、气象监测等手段相结合, 为优化补水方案提供了支持, 为类似区域地下水回灌设计、运行管理与水资源评价提供了重要参考。

关键词

水量平衡, 地下水回灌, 库容曲线, 数字孪生

Analysis of Water Balance in the Typical Groundwater Recharge Regions of Western Beijing

Qianxue Yang^{1,2}, Tao Wang^{2,3*}, Yu Gu^{2,3}, Yuwei Gong^{2,3}, Zhenglong Fan^{2,3}

¹College of Life and Environment Sciences, Minzu University of China, Beijing

²College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing

³Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing

Received: September 9, 2025; accepted: October 3, 2025; published: October 30, 2025

Abstract

Groundwater recharge is a key measure for restoring water balance, alleviating water shortages, and

*通讯作者。简介: 王韬(2003.07-), 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。Email: 202421470026@mail.bnu.edu.cn

文章引用: 杨谦雪, 王韬, 古玉, 龚雨薇, 樊正龙. 北京西部典型地下水回灌区域水量平衡分析[J]. 水资源研究, 2025, 14(5): 471-478. DOI: 10.12677/jwrr.2025.145051

enhancing the interaction between surface water and groundwater. In this study, a typical sand and gravel pit in the western Beijing is chosen and combined with three-dimensional digital twin construction methods. The water level-reservoir capacity relationship and water balance model were established to quantitatively analyze the processes of groundwater recharge and infiltration. The results indicate that precipitation and artificial replenishment are the main sources of inflow, while seepage is the main water consumption pathway, and seepage increases significantly as the water level rises. Inflow and water consumption processes are affected by precipitation and artificial recharge, resulting in periodic fluctuations. The combination of three-dimensional digital twins, water balance models and water levels, rectangular weirs, meteorological monitoring and other means provides support for optimizing water replenishment plans and serves as an important reference for groundwater recharge design, operation management and water resource evaluation in similar areas.

Keywords

Water Balance, Groundwater Recharge, Reservoir Capacity Curve, Digital Twin

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

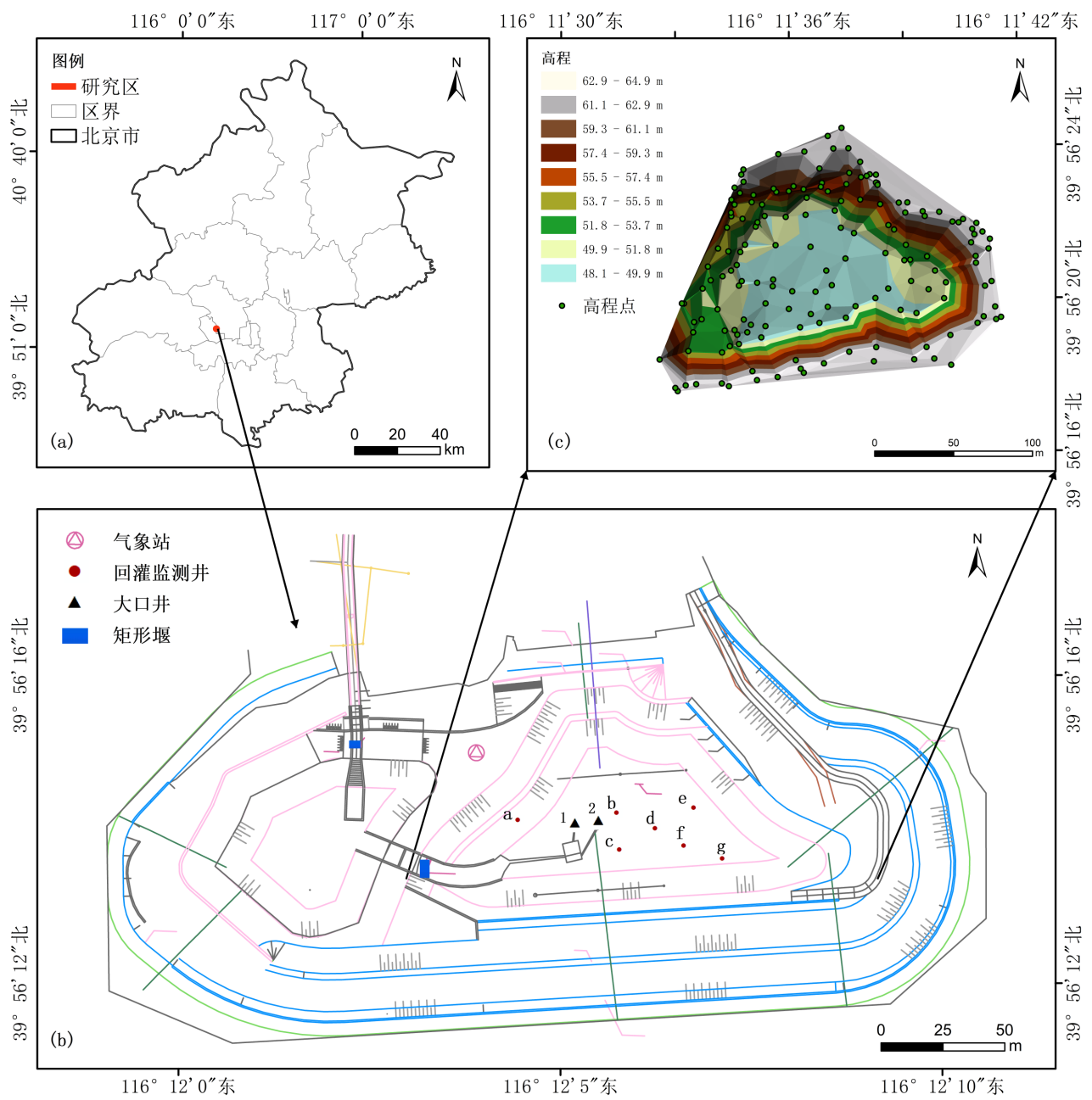
人工回灌是重建地下水采补平衡的核心手段,其作为一种可持续的水资源管理手段,受到广泛关注[1]。理想的回灌场地需要具备良好的渗透性、较大的储水空间、与目标含水层的直接连通性,并且能够有效过滤水体[2]。基于此,具有天然渗滤优势的废弃的砂石坑成为人工回灌的核心载体,其巨厚砂卵石层为高效转化地表水为地下水补给提供条件。地下水回灌技术在国内外已得到广泛实践。刘家祥等[3]于北京西郊开展人工回灌试验,实测了砂卵石层入渗能力。刘立才等[4]利用溶质运移模型,研究了南水北调水源在密怀顺水源地回灌的地下水水质变化情况。冶雪艳等[5]系统探讨了地下水人工回灌过程中介质堵塞问题的成因、机制、预测方法及控制策略。Russo 等[6]将 GIS 工具与多指标决策分析方法结合,对于人工含水层回灌场地选址进行了研究与评估,提出了包含指标权重化与敏感性分析的实用流程。Bouwer [7]全面论述了人工回灌的工程方法与水文地质要求,系统总结了入渗池、注入井等主要工程形式,讨论了场址选择、渗透条件与堵塞问题的工程对策等问题。Dillon 等[8]研究了过去六十年全球人工含水层回灌的技术演进与实施经验,概括了主要工程形式、国家指南与实践教训。

国内外已有大量的研究阐明了人工回灌的基本方法、水文地质要求及在各种场址情况下的实施经验,但许多研究仍然停留在短期的试验或应急工程层面,对于考虑地下水系统耦合的定量研究与结合长期观测资料验证等方面仍然不足[9]。人工回灌在长期、区域尺度的耦合观测和模拟,尤其复杂地形与区域尺度研究较少[10]。近年来遥感、三维建模以及数字孪生技术迅猛发展,将这些新兴技术系统性应用于回灌工程仍相对匮乏[11],鉴于此,本研究聚焦北京西部典型地下水回灌区域,采用遥感监测和数字孪生技术,结合实地调查成果,构建高精度三维数字孪生体,研究模拟回灌过程。基于三维建模模型,分析水位库容关系,开展区域汇流面积及汇流状况分析。构建区域水量平衡模型,分析实时渗漏情况,探索优化回灌策略。

2. 研究区概况

研究区位于北京市海淀区与石景山区交界处,原为 20 世纪 50 年代至 90 年代城市建筑砂石开采所形成的废弃矿坑群,其生态环境退化特征显著,此后实施了生态修复与综合整治工程[12],成为了北京西部调蓄工程的入渗场地,利用南水北调水源进行入渗回灌补给地下水,同时也纳入区域雨洪调蓄工程。最终逐步演变为集雨洪

调蓄、生态修复于一体的多功能城市雨洪管理示范区与首都西部五大战略水源地的关键节点。研究区概况如图1所示。



注：北京区位基于自然资源部国家标准地图服务网站下载的审图号为京 S(2022)019 号的标准底图制作。

图 1. 研究区概况图

研究区位于永定河冲洪积扇形成的山前倾斜平原，紧邻该洪积扇中上部，区域地势整体地势自西北向东南缓降。区域地层呈明显的空间分异特征，山麓发育坡积与洪积层，平原以冲洪积相为主，地下水赋存条件优越[13]。研究区表层以砂卵石层为主，渗透性能良好。冲洪积层由西向东，岩性由粗变细，由单一层逐渐变为多层，地下水类型由潜水变为承压水，渗透性能减弱[14]。区域属温带半湿润大陆性季风气候，多年平均降水量约 585

mm，降水集中于夏季，占全年总量 75%以上。季节性的降水格局对于回灌与水量平衡有重要影响。

3. 研究方法

以多源观测数据为基础，结合实地调查成果，构建高精度三维数字孪生模型，在水量平衡分析与水文过程模拟的基础上，对各水文要素与回灌过程开展深入研究。主要通过地形测绘、无人机航测与遥感影像获取高分辨率地形与地表覆盖信息，结合坑区及周边布设的监测井、矩形堰流量计和自动气象站等监测，收集和分析水位、入流、降水、蒸发等数据，用于综合分析渗漏过程。模型构建主要包括：利用测绘图及清淤后底图，采用 ArcGIS 完成三维数字孪生体构建；采用等高线容积法计算不同水位对应的蓄水量，结合实测水位与蓄水量，建立水位库容关系曲线；综合入流、降水补给、蒸散及蓄水等各项，构建区域水量平衡方程，结合坑内及周边监测数据，对各项水文要素变化状况开展分析。

对于数据来源，本研究的数据基础源于现场监测设备。动态水文气象数据主要通过坑区布设的监测设施获取，入口处的矩形堰测流装置(堰口宽 1 m)与自动监测设备，以 5 分钟的频率采集入流过程数据。通过坑内及周边的 7 眼监测井与 2 眼大口井，以 1 小时的频率记录水位变化；利用 1 座 HOBO H21-USB 小型自动气象站，实时采集降水量、蒸发量等气象参数。对于数据质量控制，所有原始数据均经过严格的预处理流程。首先将不同频率的监测数据统一转换为小时为单位的时间序列；其次，采用 3σ 原则对数据进行检验，识别并剔除异常值；最后，针对少量缺失数据，采用线性插值进行填补，形成完整、可靠的数据集，为后续模型构建与分析提供支撑。

研究主要技术路线如图 2 所示。

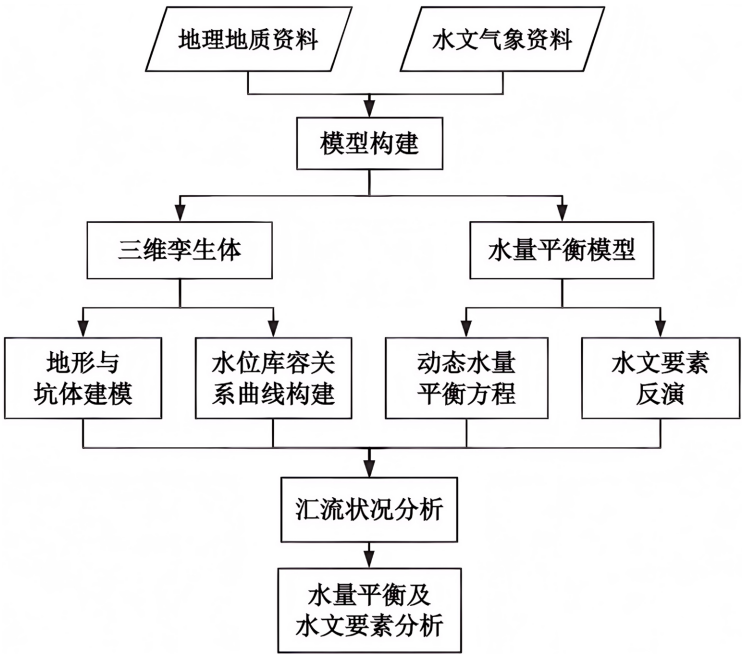


图 2. 技术路线图

3.1. 三维孪生体

砂石坑的地形与坑体建模是描述坑体特征的基础环节。这里利用 ArcGIS 对砂石坑测绘图中的高程点进行异常值剔除与内插补点，确保高程点的密度与空间连续性。然后生成不规则三角网(TIN)，如图 1(c)所示，经插值转换为分辨率为 0.5 m 的数字高程模型(DEM)，最终获得坑体的连续三维地形。对于部分水下区域，根据清淤施工记录与相邻测点高程进行推算补充。图 3 展示了生成的砂石坑 DEM 与三维地形特征。

基于 DEM 提取几何特征, 结果表明: 坑体最大长度约 280 m, 最大宽度约 150 m, 高程范围为 48~65 m, 边坡比为 1:10。清淤后的坑体平面面积约为 $1.81 \times 10^4 \text{ m}^2$, 最大深度约 9.5 m, 局部清淤区坡度明显增大, 砂石坑最大可蓄水量约为 $2.28 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

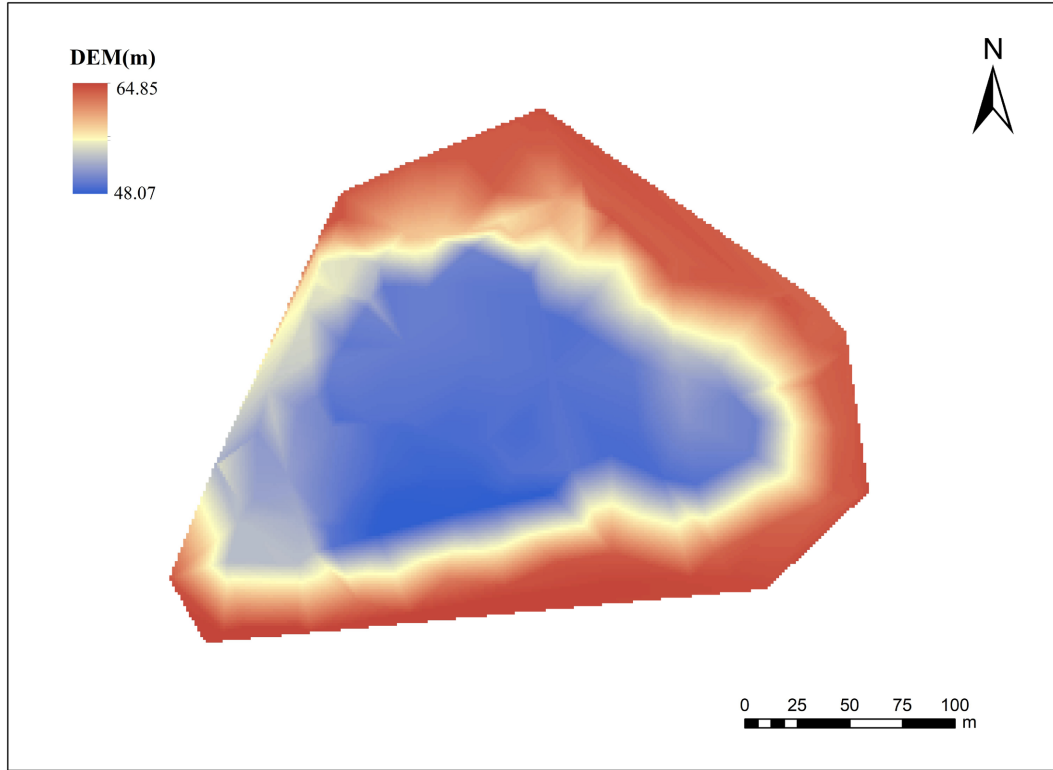


图 3. 砂石坑 DEM 与三维地形特征

水位库容曲线是水利水电工程规划设计中工程规模确定、调洪演算及排涝调蓄计算的重要工具。本研究采用等高线容积法进行库容计算, 具体为把水体按不同高程面分成 n 层台体, 整体库容由 n 层台体体积积分求得。考虑到形体的不规则性, 等高线容积法计算库容表达式如下:

$$V = \sum_{i=0}^n \frac{1}{3} (S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_i S_{i+1}}) \Delta h_i \quad (1)$$

式中: V 为库容, 单位 m^3 ; S_i 为第 i 根等高线面积, 单位 m^2 , 且 $S_0 = 0$; h_i 为第 i 至 $i+1$ 根等高线之间的高程差, 单位 m 。

考虑到砂石坑渗漏会影响其水位与库容关系的分析[15], 这里利用监测获得的水位与蓄水量数据, 对计算得到的水位库容曲线进行校正, 进行多项式拟合后, 得到的结果如图 4 所示:

$$V = -2.52Z^5 + 673.97Z^4 - 7.20 \times 10^4 Z^3 + 3.84 \times 10^6 Z^2 - 1.03Z + 1.10 \quad (2)$$

式中: V 为库容, 单位 m^3 ; Z 为水位, 单位 m 。

3.2. 水量平衡模型

结合坑内水位、入流、降水、蒸发和渗漏等要素, 研究区水量平衡方程基本形式如下:

$$V_{i+1} = V_i + W_{i,in} + W_{i,P} + W_{i,O} - W_{i,IE} \quad (3)$$

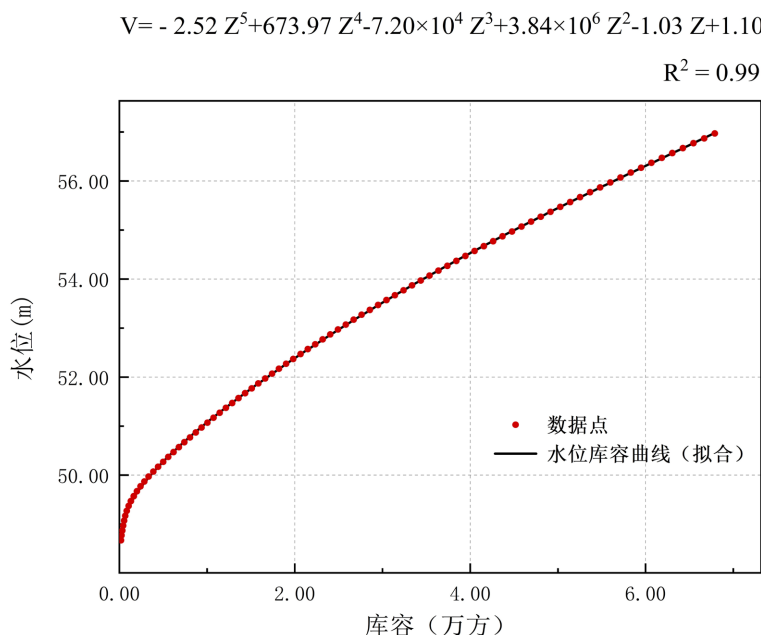


图 4. 砂石坑水位库容关系曲线图

式中: V_i 和 V_{i+1} 分别为砂石坑第 i 时段初和时段末的蓄水量; $W_{i,in}$ 为第 i 时段的补水水量; $W_{i,p}$ 为第 i 时段的降水入流量; $W_{i,o}$ 为其他来源水量; $W_{i,le}$ 为第 i 时段的渗漏(含蒸发)量。

利用砂石坑内外布设的 7 眼监测井、2 眼大口井和矩形堰流量计等监测, 采集了包括水位、入流、降水和气象等数据。基于实测水位, 由水位库容曲线得到砂石坑的蓄水量。根据项目专门设计安装的矩形过流堰(堰口宽 1 m, 过流堰口高 0.5 m), 由下面计算公式[16]得到补水水量。

$$Q = m_0 \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中, Q 为断面平均流量, 单位 m^3/s ; m_0 为包含行进流速影响的流量系数; B 为堰口宽度, 单位 m ; g 为重力加速度; H 为堰顶水头, 单位 m 。

流量系数有多种不同的计算方法, 需要根据不同堰型选择对应的公式进行计算。结合本研究的特征, 选择如下公式进行流量系数的计算。

$$m_0 = 0.4032 + 0.0534 \frac{H}{L} + \frac{1}{1610H - 4.5} \quad (5)$$

式中: L 为上游堰高, 单位 m ; $H \geq 0.025 \text{ m}$, $H/L \leq 2$ 。

在本研究中, 根据设计资料, 矩形堰的上游堰高 L 为 0.5 m。在实际监测中, 用于计算的堰顶水头 H 满足 $H \geq 0.025 \text{ m}$ 的要求。同时, 计算时段 $H = 0.16 \text{ m}$, $H/L = 0.32$, 远小于其适用上限 2。因此, 公式的使用条件得到满足。

对于降水对坑内的实际补给, 即降水入流量, 由气象站实测降水量乘以相应砂石坑面积得出。

4. 结果与分析

借助 DEM 分析了坑体及周边区域的地形特征和水流方向, 结合实地勘察表明, 砂石坑位于微洼地形的中心位置, 边界地势整体高于坑内水面, 且四周地形坡向以向外排泄为主, 未发现可持续汇入的自然沟道或人工排水通道。降水后的水流基本上沿着坑体的边界自然汇集进入坑内, 即坑体的实际面积成为水流汇聚的有效区

域。坑体不受周边地表径流的补给, 汇流范围仅限于坑体自身的水平投影面积。因无周边地表径流汇入, 汇流边界与砂石坑物理边界一致, 则可作为水量平衡的边界条件。

对研究区 2022 年 3 月~7 月水量平衡开展分析, 砂石坑蓄水量、入流量、渗漏量(含蒸发)、降水等变化过程如图 5 所示。

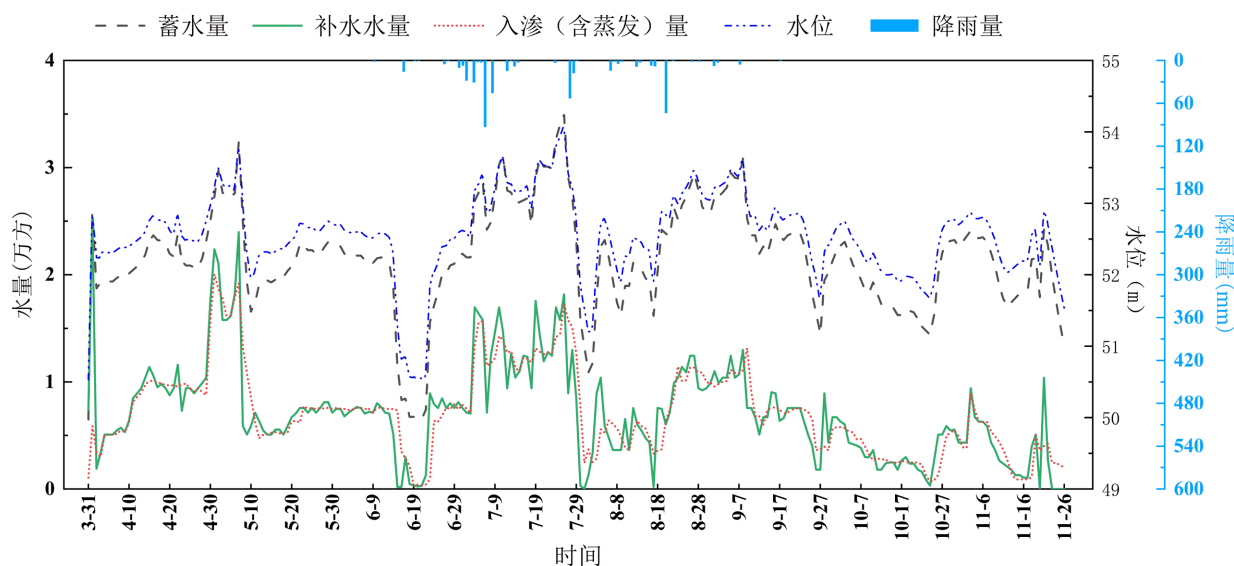


图 5. 砂石坑水量变化图

结果表明, 砂石坑蓄水量、入流量、降水量及下渗(含蒸发)量在研究期内均呈现阶段性特征。当降水发生且人工补水时, 入流量迅速增加, 蓄水量上升, 尤其是在连续补水或强降水条件下, 蓄水量增加速率明显加快。入流过程结束后, 由于坑底渗漏及蒸发作用, 蓄水量开始逐渐减少。蓄水量的数次快速上升和缓慢回落, 表明水量变化以事件驱动为主。此外, 整个过程中水位与蓄水量的变化趋势保持一致。对于回灌量, 在人工补水和降水叠加阶段, 模型反演的下渗量占同期总补水量的比重较高, 个别快速补水事件的入灌效率接近 80%。

总体上, 模型模拟的入渗(含蒸发)量与补水水量保持一致, 这验证了水量平衡模型的适用性。此外, 表明了砂石坑人工回灌的有效性, 同时也说明在缺乏补水的条件下, 坑体难以维持高蓄水状态。对模型模拟的各水量过程开展分析, 不仅揭示了砂石坑在不同水文情景下的响应机制, 也为优化补水时机、延长蓄水周期及提升地下水回补效率提供了重要参考。

5. 结论

本研究构建了北京西部典型地下水回灌区域三维数字孪生体和水量平衡模型, 定量分析了补给与消耗的时序变化特征, 并结合实测数据对模型结果进行了验证, 对区域水量平衡进行了分析。三维数字孪生体、水量平衡模型和水位、矩形堰、气象监测等手段相结合, 为后续优化补水方案提供了支持, 为类似区域地下水回灌设计、运行管理与水资源评价提供了重要参考。主要结论如下:

- 1) 砂石坑呈封闭性微洼地形, 汇流范围限定于自身水平投影面积, 无持续外部地表径流补给。清淤改造后坑底以下垫面以砂卵石为主, 产流系数较低, 砂石坑边界可作为水量平衡分析的边界条件。
- 2) 降水与人工补水是砂石坑的主要入流来源, 蒸发和渗漏是主要耗水途径。其中渗漏量占总耗水量比例较高, 砂石坑对周边地下水系统具有明显补给作用。
- 3) 入流与耗水过程受降水事件及回灌调度共同影响, 呈现阶段性波动特征。枯水期渗漏主导水量消耗, 丰

水期降水与人工回灌叠加显著增加蓄水量。

基金项目

本研究受国家科技重大专项课题(2025ZD1204403)资助。

参考文献

- [1] 常雅雯, 管清花, 陈学群, 等. 人工回灌对地下水环境影响研究综述[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 182-189.
- [2] 靳孟贵, 罗泽娇, 梁杏, 等. 再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(2): 238-246.
- [3] 刘家祥, 蔡巧生, 吕晓俭, 等. 北京西郊地下水人工回灌试验研究[J]. 水文地质工程地质, 1988(3): 1-6+48.
- [4] 刘立才, 郑凡东, 李炳华, 等. 南水北调水源在密怀顺水源地回灌的地下水水质变化试验[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 18-22+55.
- [5] 冶雪艳, 孙邱杰, 杜新强, 等. 地下水人工补给过程介质堵塞及控制研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4145-4156.
- [6] RUSSO, T. A., FISHER, A. T. and LOCKWOOD, B. S. Assessment of managed aquifer recharge site suitability using a GIS and modeling. Groundwater, 2015, 53(3): 389-400. <https://doi.org/10.1111/gwat.12213>
- [7] BOUWER, H. Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 121-142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- [8] DILLON, P., STUYFZAND, P., GRISCHEK, T., et al. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. Hydrogeology Journal, 2019, 27(1): 1-30.
- [9] SUFYAN, M., MARTELLI, G., TEATINI, P., et al. Managed aquifer recharge for sustainable groundwater management: New developments, challenges, and future prospects. Water, 2024, 16(22): 3216. <https://doi.org/10.3390/w16223216>
- [10] MELES, B. M., BRADFORD, S., TRASVINA, C. A., et al. Uncovering the gaps in managed aquifer recharge for sustainable groundwater management: A focus on hillslopes and mountains. Journal of Hydrology, 2024, 639: 131615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131615>
- [11] AFZAL, M., LIU, T., BUTT, A. Q., NADEEM, A. A., ALI, S. and PAN, X. Geospatial assessment of managed aquifer recharge potential sites in Punjab, Pakistan. Remote Sensing, 2023, 15(16): 3988. <https://doi.org/10.3390/rs15163988>
- [12] 刘向阳, 邓卓智, 王赞, 等. 北京市西郊砂石坑生态修复设计[J]. 水利发展研究, 2016, 16(1): 70-73+77.
- [13] 郝奇琛, 邵景力, 谢振华, 等. 北京永定河冲洪积扇地下水人工调蓄研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 12-18.
- [14] LIU, K., QIAO, X. J., WANG, S. S., et al. Understanding of groundwater evolution through chemical and age dating information in the Yongding River alluvial fan in Beijing. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: Article ID 1056607.
- [15] 王彪, 姚旭初, 石维新, 等. 永定河山峡段生态补水过程渗漏特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1208-1216.
- [16] 王文娥, 廖伟, 陈土成, 等. 堰槽组合设施测流机制试验研究[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 922-932.