

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.014

地下构筑物对地下水头和滞留时间的影响机制

井 森¹, 杨思敏¹, 刘 瑾¹, 张 刚², 杨 跃², 孙梦雅¹, 马青山³, 鲁春辉^{4,5}

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省水文地质工程地质调查大队, 江苏 淮安 210049;
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于地下构筑物屏障效应的定义, 引入等效屏障深度的概念, 推导了含水层侧向定流量、侧向定水头和均匀面状补给 3 种边界条件下城区承压含水层地下水水头、地下水滞留时间分布和平均滞留时间的解析解, 并设计了数值模拟试验进行对比验证。验证结果表明: 解析解与数值解吻合效果较好, 而仅当地下构筑物的尺寸相对较大时, 由于水力弥散现象的出现, 拟合效果欠佳; 平均滞留时间的解析解在各种模拟工况下都与数值解吻合较好(相对误差不高于 5.94%), 表明即便在三维流场中也可以使用推导的解析解来估算承压含水层的平均滞留时间。进一步利用成都地铁 2 号线 4 个站点建造前后的现场数据进行解析解公式的验证计算, 结果表明, 相比于地下水水头, 平均滞留时间对地下构筑物参数的变化表现出更高的敏感性。

关键词: 地下水滞留时间; 解析解; 承压含水层; 地下水流场; 地下构筑物

中图分类号: P641; TU91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0116-11

Influence mechanism of underground structures on groundwater head and retention time

JING Miao¹, YANG Simin¹, LIU Jin¹, ZHANG Gang², YANG Yue², SUN Mengya¹, MA Qingshan³, LU Chunhui^{4,5}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Province Hydrogeology Battalion, Huaian 210049, China;

3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;

4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the definition of the barrier effect of underground structures, the concept of equivalent barrier depth was introduced. Analytical solutions for the groundwater head, groundwater retention time distribution, and average retention time in the urban confined aquifer under three boundary conditions of constant flow rate, constant head, and diffuse recharge were derived. Numerical experiments were set up to verify the results, and the results show that the analytical solution is in good agreement with the numerical solution. The results demonstrate that the analytical solution is in strong agreement with the numerical solution. However, the fitting performance deteriorates due to hydrodynamic dispersion when the dimensions of the underground structure are relatively large. Moreover, the analytical solutions of the average retention time agree well with the numerical results in various simulation cases (with a relative error of no more than 5.94%). Even in the three-dimensional flow field, the derived analytical solutions can be used to estimate the average retention time of confined aquifers. Finally, the analytical solution is applied to the confined aquifer flow field before and after the construction of four subway stations in Chengdu Metro Line 2. The calculation results show that compared to the head, the retention time is more sensitive to the parameters of underground structures.

Key words: groundwater retention time; analytical solution; confined aquifer; flow field; underground structure

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52109012); 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2340212); 江苏省自然资源科技项目(JSZRKJ202507)

作者简介: 井森(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土-地下水数值模拟技术研究。E-mail: mjing@hhu.edu.cn

通信作者: 刘瑾(1983—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境工程地质研究。E-mail: jinliu920@163.com

引用本文: 井森, 杨思敏, 刘瑾, 等. 地下构筑物对地下水头和滞留时间的影响机制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 116-126.

JING Miao, YANG Simin, LIU Jin, et al. Influence mechanism of underground structures on groundwater head and retention time[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 116-126.

城市化是全球发展的重要趋势。截至 2024 年,全球约 54% 的人口居住在城市,预计到 21 世纪末,这一比例将上升至 60%~92%^[1];而我国城市化率已经超过 60%,预计到 2030 年将接近 70%,到 2050 年可能达到 80%^[2]。随着全球城市人口的持续增长,未来城市对淡水资源的需求将显著增加,地下水资源在城市区域的重要性也日益凸显。在欧洲,地下水是城市地区重要的淡水来源,部分城市高达 40% 的供水量取自城市承压含水层^[3]。2023 年,中国地下水供水量占全国总供水量的 13.9%,而在北方部分地区,这一比例甚至超过 50%^[4]。

地下空间的开发与利用是实现国土资源优化配置与高效利用的必然要求。随着城市密集化发展,地下空间(如地铁、地下停车场及隧道等)的开发正朝着深层化和综合化的方向演进^[5-6]。不透水地下构筑物会减少承压含水层过水断面面积,从而对地下水流动产生屏障效应,同时可能改变地下水的质量和温度^[7-8]。此外,地下构筑物的建造和后续的生态修复过程也会对地下水流场造成影响。例如,明挖法作为地下工程中广泛应用的施工方法,在地下水水位较高的区域施工时通常需要先进行排水处理,该过程可能引发显著的水头震荡效应,并改变局部地下水的流动模式^[9-10]。而在已破坏的地区进行生态修复时,其所用到的改良材料及生物聚合物也会对当前区域的地表水和地下水产生影响^[11-12]。

地下水滞留时间是指水分子从通过降水入渗进入承压含水层开始,到其通过径流、蒸发或抽水等方式离开承压含水层为止所经历的时间。滞留时间分布则是指地下水中所有水分子滞留时间的概率密度分布函数。地下水滞留时间分布是评估承压含水层的更新能力及其对污染物承载能力的重要指标,与多种水文和环境问题密切相关,如地下水资源的可再生性、地下水运移路径的识别^[13]、承压含水层对面源污染的敏感性^[14],以及地下水对气候变化的响应机制^[15]等。若地下水在某一承压含水层的滞留时间较长,可能表明其中的污染物已得到充分降解,但也可能反映出水体的更新能力较弱,对污染响应存在滞后性^[16]。随着经济社会的发展和人口的增长,人类对淡水资源,特别是城市地下空间中水资源的依赖程度日益增强。

关于地下水滞留时间分布,已有研究主要集中在均匀或线性补给条件下的均质天然承压含水层^[17],以及非均匀补给的不规则非均质天然承压含水层^[18-19],而对于城市系统的研究相对较少。对于滞留时间,国内的研究尚处于初步阶段,前期研究主要为利用同位素测算地下水年龄以及评价地下水资源。例如,陈茜茜等^[20]综述了我国北方地区常用的地下水年龄测定方法;汪集旻等^[21]总结了同位素技术在地下水研究中的应用现状,并提出了未来的发展方向;余钟波等^[22]利用氢同位素分析不同河段的水力联系,进而对当地水资源环境进行评估。研究方向主要集中在概念研究、同位素示踪技术及拟合方法的应用,以获取滞留时间并进一步研究承压含水层特性。例如,翟远征等^[23]分析了滞留时间对承压含水层更新能力的影响;杨娜等^[24]系统梳理了地形、土壤及气象等因素对滞留时间的影响及其研究进展;邱菊等^[25]采用氢氧稳定同位素分析岩溶槽谷区隧道建设对平均滞留时间的影响;刘花台等^[26]则利用镭同位素对海水滞留时间进行了研究。随着现代施工技术的发展,地下构筑物可能与承压含水层产生强烈的相互作用,这种相互作用不仅能影响地下水的流动过程,还能强烈地改变溶质的运移、吸附和降解过程^[27]。因此,了解地下构筑物对地下水滞留时间的影响,对城市地下水资源管理至关重要。

本文推导了承压含水层中受不透水地下构筑物影响的地下水滞留时间解析解,在推导过程中引入了等效屏障深度的概念,将三维问题简化为二维问题处理。研究中设定了 3 种典型边界条件,并分别推导出相应的解析表达式。为验证解析解的准确性与可靠性,将其计算结果与数值模拟结果进行了对比,并利用成都地区地铁建设前后的地下水数据进行了验证,结果表明,本文提出的三维简化方法和解析解具有有效性和实用性。

1 解析解推导

城市地下水系统中,多数承压含水层的几何形状不规则,水力参数呈非均质性。因此,在理论推导前需要将承压含水层概化,即假设其为几何形状规则、水力参数均质的理想化承压含水层。该理想化承压含水层下方为弱透水层,且长度远大于厚度,因此可将地下水流简化为裘布依(Dupuit-Forchheimer)类型。同时,将地下构筑物的形状简化为正六面体,并与承压含水层相交。在地下水流中,假定以对流作用为主,不考虑扩散和弥散作用。

不透水地下构筑物可被视为阻碍地下水运动的地下屏障。地下屏障可分为两种情况:①完全阻塞横向承压含水层的屏障,即地下屏障宽度与承压含水层宽度(W)相同(图 1);②部分阻塞横向承压含水层的屏

障,即地下屏障宽度小于承压含水层宽度(图2)。在第1种情况下,地下水流场可简化为二维横截面模型;而第2种情况下,地下水在构筑物周围环绕流动,地下水流场是三维的,且承压含水层的深度远远小于其长度,因此引入一个新参数——等效屏障深度 d_1 :

$$d_1 = w_z d$$

(1)

其中

$$w_z = w_b / W$$

式中: w_z 为地下构筑物归一化宽度; w_b 为地下构筑物宽度; d 为地下构筑物深度。第1种情况下, $w_b = W$,因此 $d_1 = d$ 。引入等效屏障深度的概念后,二维截面模型可以近似地代替三维模型,进一步简化解析解的推导。

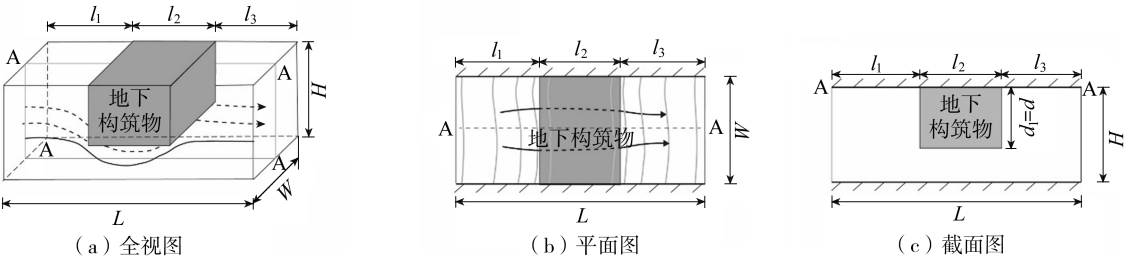


图1 完全阻塞横向承压含水层的屏障

Fig. 1 The barrier that completely blocks confined aquifer

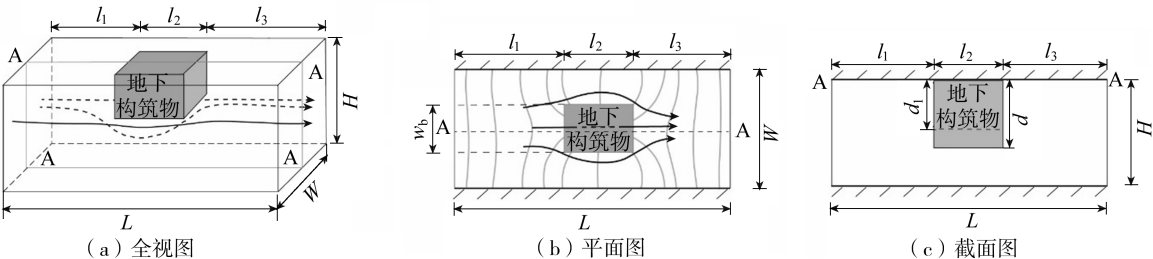


图2 部分阻塞横向承压含水层的屏障

Fig. 2 The barrier that partially blocks confined aquifer

1.1 承压含水层的边界条件

承压含水层的下游为排泄区,因此将下游设为固定水头边界。承压含水层上游的边界条件设置了3种情况:①侧向定流量边界;②侧向定水头边界,以上两种情况都不接受上覆弱透水层的补给,因此属于活塞流模型;③接受来自上覆弱透水层的均匀面状补给。

1.1.1 侧向定流量边界

首先假设一个理想的、渗透流量恒定的承压含水层,在此条件下,承压含水层不接受上覆弱透水层的补给,因此地下水流可以看作活塞流。

在地下构筑物建造之前,假设承压含水层不发生弥散性渗漏,则渗透流速 v_0 可表示为

$$v_0 = K(h_1 - h_2) / L$$

(2)

式中: K 为渗透系数; h_1 、 h_2 分别为地下构筑物建造前承压含水层上端和下端的水头; L 为承压含水层的长度。

活塞流模型的地下水滞留时间分布可以简化为狄拉克函数 δ :

$$\rho = \delta(t - T_p)$$

(3)

其中

$$T_p = \theta L / v_0 = \theta L^2 / K[(h_1 - h_2)]$$

式中: ρ 为整个含水层地下水滞留时间分布函数; t 为地下水滞留时间; T_p 为构筑物建造前承压含水层的地下水平均滞留时间; θ 为承压含水层中的有效孔隙度。

地下构筑物建造后,可将承压含水层划分为上游区、下游区和构筑物区3个独立的子系统,其侧向定流量边界的承压含水层模型如图3(a)所示,此时承压含水层的渗透流速为 v_0 。为了简化解析解的推导,引入无量纲参数 d_{1z} 和 d_z :

$$d_{1z} = d_1 / H \quad d_z = d / H$$

(4)

式中 H 为承压含水层厚度。有水流通过时,不透水的地下构筑物减小了承压含水层的过水断面面积,但流

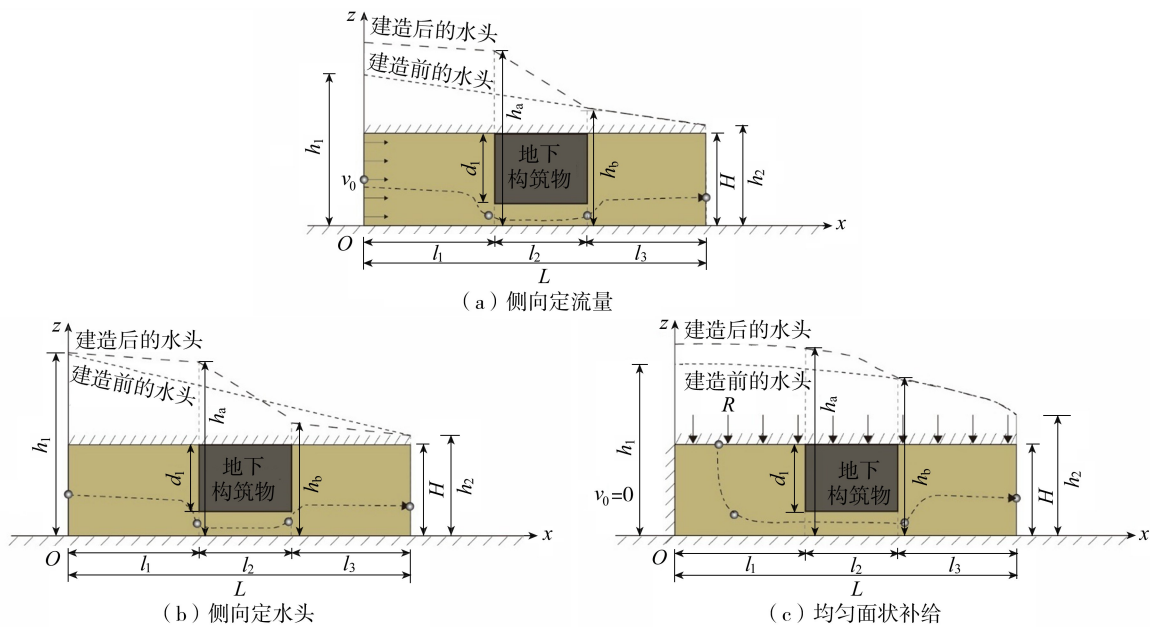


图 3 3 种边界条件下的城市承压含水层系统二维横截面

Fig. 3 Two-dimensional cross-section of urban confined aquifer system under three boundary conditions

入承压含水层的流量不变,因此流速加快。构筑物建造后承压含水层水头计算公式为

$$h = \begin{cases} h_a + v_0(l_1 - x)/K & x < l_1 \\ h_b + v_0(l_1 + l_2 - x)/[K(1 - d_{1z})] & l_1 \leq x < l_1 + l_2 \\ h_2 + v_0(L - x)/K & x \geq l_1 + l_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$h_b = h_2 + v_0 l_3 / K \quad h_a = h_b + [v_0 l_2 / K(1 - d_{1z})]$$

式中: h_b 为不透水构筑物建造后下游区的水头; h_a 为不透水构筑物建造后上游区的水头; l_1 为地下承压含水层上游段长度; l_2 为地下构筑物长度; l_3 为承压含水层下游段长度。因此,跨越地下构筑物区的地下水滞留时间 t_b 计算式为

$$t_b = \theta l_2 / v_b = \theta l_2 (1 - d_{1z}) / v_0 \quad (6)$$

其中

$$v_b = v_0 / (1 - d_{1z})$$

式中 v_b 为穿过地下构筑物横截面的渗透流速。

整个承压含水层的地下水平均滞留时间即为上游区、构筑物区和下游区 3 个子系统滞留时间加权平均之和,其中上游区未受构筑物的影响,建造后的地下水滞留时间分布也可用式(3)表示。构筑物建造后,整个承压含水层的平均滞留时间表示为

$$T = \theta(l_1 + l_3) / v_0 + t_b = \theta(L - d_{1z} l_2) / v_0 \quad (7)$$

1.1.2 侧向定水头边界

在侧向定水头边界条件下,地下构筑物的建造减少了承压含水层的过水断面面积。由于承压含水层两端水头不变,因此地下水的渗透流量会发生变化,而地下构筑物建造前地下水滞留时间与侧向定流量边界情况完全相同。

地下构筑物建造后侧向定水头边界承压含水层模型如图 3(b) 所示。为了计算构筑物建造后地下水的滞留时间,需先计算水流越过地下构筑物后水头的变化。在上游段和下游段, v_b 可表示为

$$v_b = K[(h_1 - h_a) / l_1] = K[(h_b - h_2) / l_3] \quad (8)$$

在构筑物段的渗透流速 v_{b1} 直接与 v_b 相关:

$$v_{b1} = v_b / (1 - d_{1z}) = K[(h_a - h_b) / l_2] \quad (9)$$

联立式(8)(9),得到 h_a 、 h_b 的表达式:

$$h_a = h_1 - l_1(h_1 - h_2) / [l_2 / (1 - d_{1z}) + l_1 + l_3] \quad (10)$$

$$h_b = h_2 + l_3(h_1 - h_2) / [l_2 / (1 - d_{1z}) + l_1 + l_3] \quad (11)$$

侧向定水头边界条件下地下水的平均滞留时间即为承压含水层 3 个子系统的平均滞留时间之和,可表示为

$$T = L\theta[l_2/(1 - d_{1z}) + l_1 + l_3]/K(h_1 - h_2) \tag{12}$$

1.1.3 均匀面状补给边界

假设承压含水层接受来自上覆透水层的均匀面状补给(图 3(c)),则建造前承压含水层渗透流量可由达西定律表示:

$$Q = -KH(dh'/dx) \tag{13}$$

式中 h' 为构筑物建造前承压含水层水头。

由于承压含水层渗透流量受面状补给率 R 的影响,则有

$$dQ = Rdx \tag{14}$$

将式(14)积分并与式(13)联立,以 $x=0$ 时 $dh'/dx = 0$ 和 $x=L$ 时 $h'=h_2$ 作为边界条件,得到建造构筑物前承压含水层的水头:

$$h' = R(L^2 - x^2)/2KH + h_2 \tag{15}$$

地下构筑物建造后,假设完全不考虑其造成的水流弥散作用,即承压含水层上游和下游均不受弥散作用干扰,利用与侧向定水头边界情况相同的推导方法,则水头表达式为

$$h = \begin{cases} R(l_1^2 - x^2)/2KH + h_a & 0 \leq x < l_1 \\ Rl_1(l_1 + l_2 - x)/[KH(1 - d_{1z})] + h_b & l_1 \leq x < l_1 + l_2 \\ R[(L - l_2)^2 - (x - l_2)^2]/2KH + h_2 & x \geq l_1 + l_2 \end{cases} \tag{16}$$

其中

$$h_b = R[(L - l_2)^2 - l_1^2]/2KH + h_2 \quad h_a = Rl_1l_2/[KH(1 - d_{1z})] + h_b$$

Raats 等^[28-29]推导了地下构筑物建造前滞留时间分布的表达式,认为若满足裘布依假设、承压含水层均质,及 R 和 $\theta H/R$ 恒定,则滞留时间分布遵循指数形式。构筑物建造前地下水滞留时间分布的表达式为

$$\rho = \exp(-t/T_p)/T_p \tag{17}$$

其中

$$T_p = \theta H/R$$

则整体承压含水层滞留时间分布即为建造构筑物后承压含水层 3 个子系统滞留时间的组合:

$$\rho_T = \begin{cases} \exp(-t/T_p)/T_p & t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_1 + t_2 \\ \frac{l_{1z}}{T_p(1 - l_{2z})} \frac{-(t - t_1 - t_2)}{T_p} & t \geq t_1 + t_2 \end{cases} \tag{18}$$

其中 $t_1 = T_p \ln[(1 - l_{2z})/(1 - l_{3z} - l_{2z})]$ $t_2 = l_{2z}T_p(1 - d_{1z})/l_{1z}$ $l_{1z} = l_1/L$ $l_{2z} = l_2/L$ $l_{3z} = l_3/L$
式中 l_{1z} 、 l_{2z} 、 l_{3z} 分别为上游区、构筑物区和下游区长度的归一化处理。同样地,整个承压含水层的平均滞留时间通过 3 个子系统的平均滞留时间质量加权平均得到:

$$T = T_1l_{3z}/(1 - l_{2z}) + T_2l_{1z}/(1 - l_{2z}) \tag{19}$$

其中

$$T_1 = \{\ln[(1 - l_{3z} - l_{2z})/(1 - l_{2z})]\} T_p(1 - l_{2z})/l_{3z} \quad T_2 = T_p + t_1 + t_2$$

式中 T_1 、 T_2 分别为下游区和上游区的平均滞留时间。

1.2 地下屏障作用的量化

地下构筑物对地下水流场的影响可分为局部影响和整体影响两类。其中,局部影响指构筑物附近的流场响应,而整体影响指整个承压含水层的响应。用整个承压含水层平均滞留时间的相对变化 ΔT 作为衡量地下构筑物整体影响的指标:

$$\Delta T = T/T_p \tag{20}$$

同时,用穿越构筑物区域滞留时间的相对变化 Δt 作为衡量局部影响的指标:

$$\Delta t = t_2/t_p \tag{21}$$

式中 t_p 为建造前穿过地下建筑的滞留时间。

除了滞留时间的相对变化,水头的变化 Δh 也可以用于衡量地下构筑物对水头的屏障作用:

$$\Delta h = \Delta h_A - \Delta h_B \tag{22}$$

其中
$$\Delta h_A = h_1 - h_2 \qquad \Delta h_B = h_a - h_b$$
式中: Δh_A 为构筑物建造前左右边界的水头差; Δh_B 为地下构筑物建造后其前后的水头差。

2 解析解验证

2.1 数值解的计算

等效屏障深度概念的提出,能将承压含水层二维化,进而推导出滞留时间的解析解。但考虑到地下构筑物周围可能存在水动力弥散,这种简化方法的有效性尚不明确。为了验证该简化方法和解析解推导的可靠性,设计了一组数值模拟试验进行对比分析。

在进行数值模拟试验验证时,分别设计了 3 种承压含水层尺寸(A1、A2、A3)和两种地下构筑物尺寸(B1、B2),共 6 个工况。设置承压含水层的长度为 500 m,厚度为 10 m,宽度分别为 10、50、100 m。承压含水层和地下构筑物尺寸的具体参数设置见表 1,3 种边界条件的参数设置见表 2。

表 1 承压含水层和地下构筑物几何参数设置

Table 1 Geometric parameter settings of confined aquifers and underground structures						
承压含水层	地下构筑物	W/m	l_{2x}	l_{3x}	d_z	w_z
A1	B1	10	0.20	0.40	0.25	1.0
	B2	10	0.30	0.35	0.56	1.0
A2	B1	50	0.20	0.40	0.50	0.5
	B2	50	0.30	0.35	0.80	0.7
A3	B1	100	0.20	0.40	0.50	0.5
	B2	100	0.30	0.35	0.80	0.7

表 2 不同边界条件下承压含水层的参数设置

Table 2 Parameter settings for confined aquifers under different boundary conditions					
边界条件	滞留时间模型	$v_0/(m/s)$	h_0/m	$R/(m/s)$	$K/(m/s)$
侧向定流量	活塞型	5.00×10^{-7}			5.00×10^{-5}
侧向定水头	活塞型		15.00		5.00×10^{-5}
均匀面状补给	指数型			1.27×10^{-8}	5.00×10^{-5}

采用地下水模拟软件 MODFLOW-2005 进行流场模拟,用分子跟踪模块测算地下水分子的流动路径和滞留时间。将模型区域剖分成 x 、 y 、 z 方向上大小为 $5\text{ m}\times1\text{ m}\times0.5\text{ m}$ 的网格。模拟开始后,将 10 000 个水分子均匀地注入补给区,进而得到水分子的滞留时间折线图(图 4)。

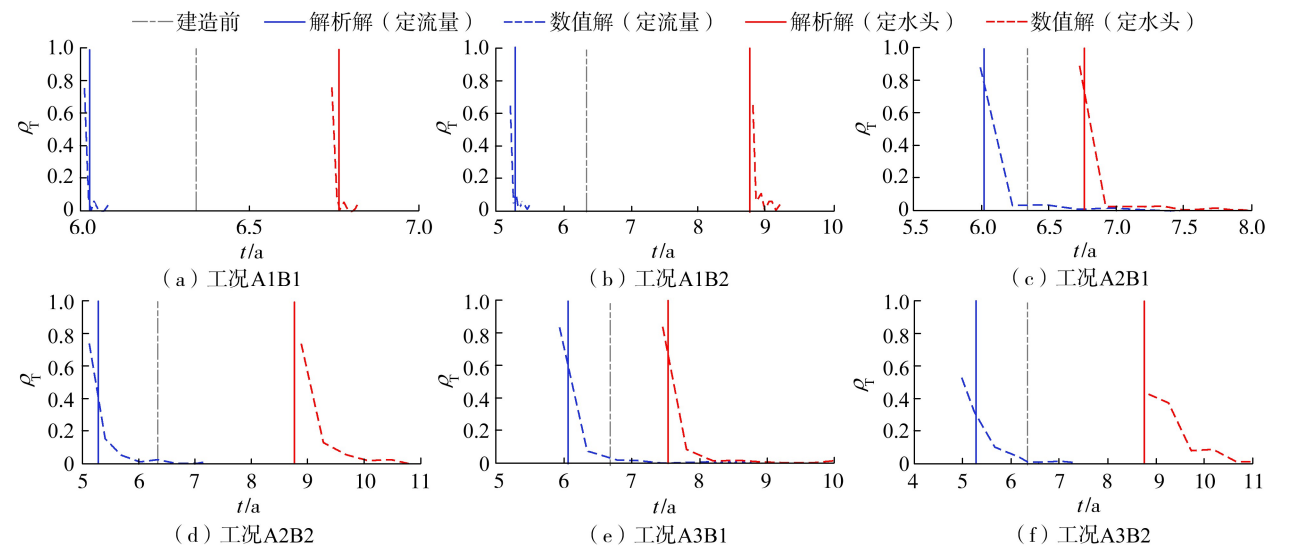


图 4 6 个模拟场景中的地下水滞留时间分布解析解与数值解的对比

Fig. 4 Comparison of analytical and numerical solutions of groundwater retention time distribution in six simulation scenarios

2.2 解析解与数值解的对比

如图 4 所示,数值解和解析解对应最好的工况为 A1B1 和 A1B2,这两种工况都是地下构筑物在宽度上完全贯穿承压含水层的二维模型。由此看出,在二维横截面模型中,解析解能够较准确地计算地下水滞留时间。当承压含水层的宽度从 10 m 增加到 100 m 时,单个分子滞留时间的数值解与解析解开始逐渐偏离。由于排除了地下构筑物与承压含水层相对位置这一干扰因素,这种偏离的主要原因可能是地下构筑物尺寸大小的影响。由工况 B1 与 B2 对比可以看到,相对较大尺寸的地下构筑物(如工况 B2)可能会导致滞留时间产生巨大的变化,在侧向定水头边界条件下尤为明显,即地下构筑物对侧向定水头边界的影响更大。对比二维截面模型(工况 A1)和三维截面模型(工况 A3),可以观察到滞留时间存在拖尾现象。这种现象可能是平行于水力梯度方向的渗流受到了地下构筑物的阻碍而引起的。另外,由图 4 还可看出,地下构筑物的屏障作用在不同边界条件下的影响不同:在侧向定流量边界条件下,地下构筑物会减小平均滞留时间,而在侧向定水头边界条件下则相反;同时,较大尺寸的地下构筑物在侧向定水头条件下产生的影响会更加显著。究其原因,是相比于侧向定流量边界条件,侧向定水头边界条件下的渗流场更容易被地下不透水构筑物影响。

虽然图 4 能直观地看出解析解与数值解的对比,但无法量化两者之间的对应关系,因此引入平均滞留时间的相对误差 ε 和示踪粒子滞留时间的变异系数 c_v 两个指标来描述该量化关系:

$$\varepsilon = |M_a - M_n| / M_n$$

(23)

$$c_v = \sigma_n / M_n$$

(24)

式中: M_a 、 M_n 分别为平均滞留时间的解析解和数值解; σ_n 为单个水分子滞留时间的标准差。由于侧向定流量和侧向定水头两种边界条件为活塞流模型,所以这两种边界条件下解析解的 $c_v=0$ 。

侧向定流量和侧向定水头边界条件下 6 个工况的 ε 和 c_v 值如表 3 所示。可以看出,两种边界条件下解析解和数值解的拟合程度很好,最大的 ε 均小于 6%;同时,6 种工况的 c_v 较小,表明推导的解析解能够近似计算三维复杂承压含水层中的平均滞留时间,但由于水动力弥散现象的存在,单个水分子的滞留时间会出现很大偏差。与图 4 展示的解析解的误差随着承压含水层宽度和构筑物尺寸的增加而增加的规律类似,表 3 结果也能证明地下构筑物的存在会阻碍地下水流的运动,引起周围的水流出现水动力弥散,导致平均滞留时间的数值解与解析解偏差变大。尽管如此,本文推导的解析解仍为现实世界的三维流场问题提供了平均滞留时间近似值的计算方法,可以用来快速估算城市地下承压含水层系统中地下水的平均滞留时间。

表 3 侧向定流量和侧向定水头边界下的相对误差和变异系数
Table 3 Relative error and coefficient of variation under lateral constant flow and lateral constant head boundary conditions

承压含水层	地下构筑物	侧向定流量边界/%				侧向定水头边界/%	
		ε	c_v	ε	c_v	ε	c_v
A1	B1	0.07	0.27	0.12	0.25		
	B2	0.16	1.53	1.40	1.25		
A2	B1	1.00	3.53	0.83	2.67		
	B2	1.18	5.68	4.59	4.32		
A3	B1	0.95	3.63	1.11	2.77		
	B2	1.06	7.09	5.94	5.54		

图 5 为侧向定流量边界条件下 6 种工况的水分子流动路径和滞留时间。在二维工况(A1)下,由于地下构筑物在水平方向完全穿透承压含水层,主要的水流方向为 x 方向。而在 A2 和 A3 的工况中,地下构筑物仅部分穿透三维承压含水层,为确保构筑物在三维模型中所起到的等效阻水效应与二维模型(工况 A1)中完全穿透的情况相似,在 A2 和 A3 工况中设置了比 A1 更大的地下构筑物深度。图 5(a)(b)显示流动路径在 xOz 平面内,导致垂直于水力梯度方向的滞留时间均匀分布。然而,当水分子子流经 A2 和 A3 的地下构筑物时,可以观察到流动路径的强烈弥散现象。这些弥散的流动路径导致了图 4 中滞留时间的拖尾现象,也是解析解与数值解偏离的原因。

图 6 为均匀面状补给边界条件下地下水滞留时间分布解析解与数值解的对比情况。在该边界条件下,承压含水层从上覆弱透水层接受补给,符合地下水滞留时间的指数模型(图 6 中的点划线)。图 6 表明,在大多数场景中,滞留时间分布的解析解与数值解的拟合程度较好;但也能看出,地下构筑物尺寸很大程度影响了解析解和数值解的拟合程度。当地下构筑物尺寸相对于承压含水层较小时(如工况 B1 和 B2),滞留时间分布的解析解和数值解比较吻合;但当承压含水层宽度和地下构筑物的尺寸都显著增大时(工况 A3B2),会出现解析解和数值解不匹配的现象,尤其在地下构筑物和承压含水层之间的过渡区域(图 6(f))。尽管存在轻微的不匹配现象,但 6 种工况的 ε 都小于 2%(最大为工况 A1B1, $\varepsilon=1.75\%$;最小为工况 A3B2, $\varepsilon=0.37\%$),表明

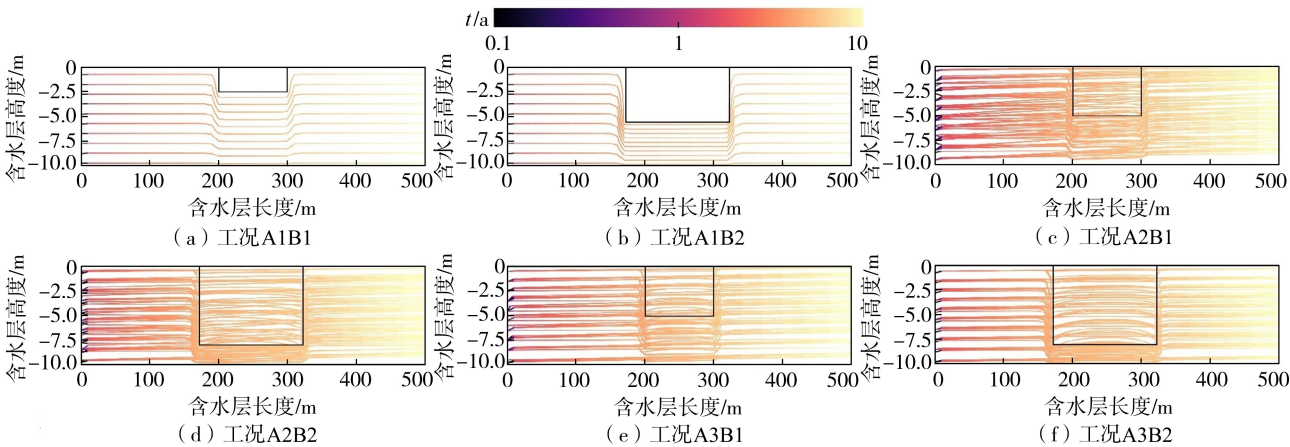


图 5 侧向定流量边界条件下的水分子流动路径

Fig. 5 Water molecule's flow path under constant lateral flow boundary condition

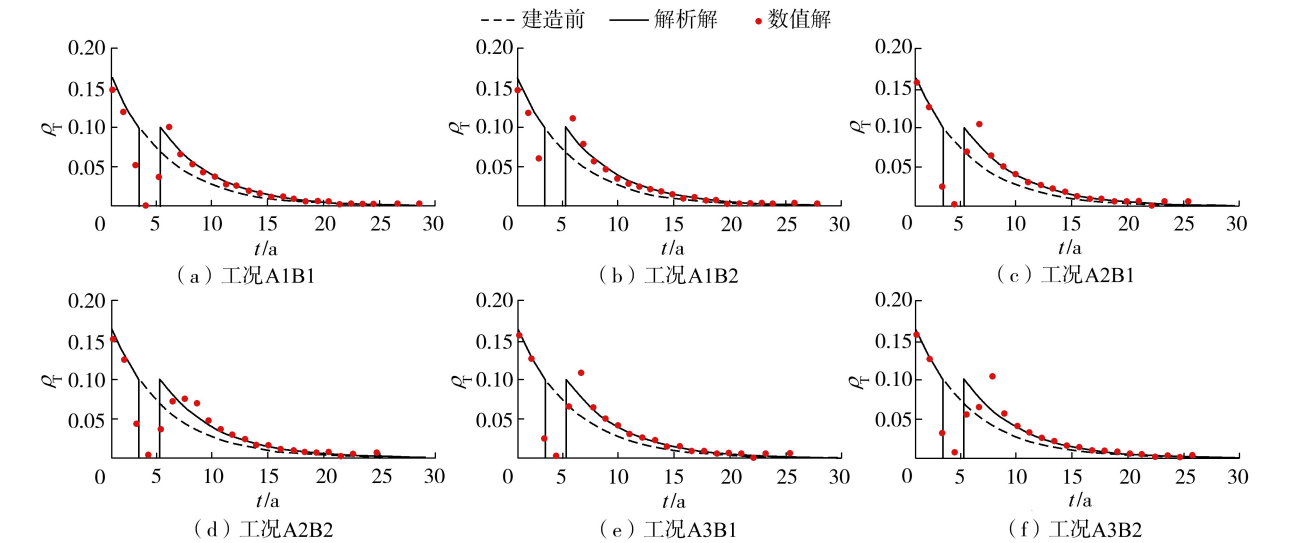


图 6 均匀面状补给边界条件下地下水滞留时间分布解析解与数值解的对比分布

Fig. 6 Comparison between analytical solution and numerical solution of groundwater retention time distribution under diffuse recharge

即使对于地下构筑物尺寸较大的承压含水层,解析解也能计算出较准确的平均滞留时间。可见,地下构筑物周围水流的水动力弥散现象改变了滞留时间分布,但其对平均滞留时间的影响微乎其微。 ε 的计算进一步证实了在裘布依假设下,即使地下构筑物的尺寸较大,本文推导的解析解表达式也能精确预估地下水平均滞留时间。

图 7 为均匀面状补给边界条件下,6 种工况水分子的流动路径和地下水滞留时间在 xOz 平面上的二维投影。由于地下构筑物的阻隔,水分子的流线分为两组:以地下构筑物为界,前半段是年龄相对较新的流线,后半段是年龄相对较老的流线,分别对应上游区和下游区的均匀面状补给边界条件。可见,地下构筑物只影响来自上游段的流线分布,因此对滞留时间的前期分布没有影响。与 A1B1 和 A1B2 两种工况类似,工况 A2 和 A3 中地下构筑物的建造会出现水动力弥散现象,最终导致了如图 6 所示的解析解与数值解之间的误差。

3 实例分析

为验证本文推导的解析解的有效性,选取成都地铁 2 号线建造前后的水文地质数据进行实例分析^[30]。成都地铁 2 号线施工区域位于成都平原,受区域水文地质环境条件的限制,地下水流总体为北西向南东方向流动。根据水文地形地貌特征和水文地质条件,成都市区可分为西部平原强富水区、中部平原中等富水区和东部台地贫水区 3 个水文地质区,各区概况见表 4。因西部平原强富水区和中部平原中等富水区地处成都市中心位置,且地下水埋藏条件较好,因此选择该区域的地下车站作为研究区域,在验证解析解有效性

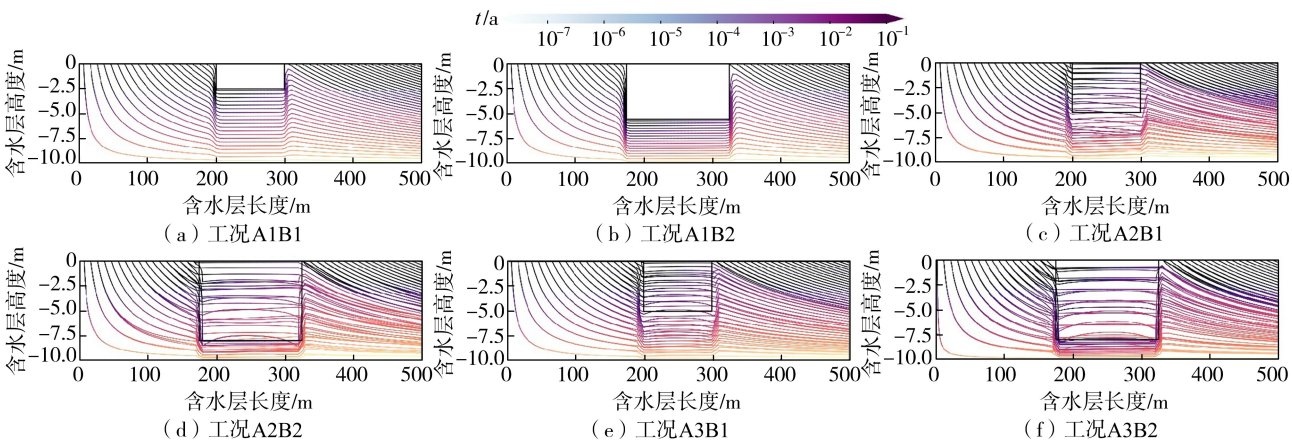


图 7 均匀面状补给边界条件下水分子流动路径和地下水滞留时间

Fig. 7 Water molecule’s flow paths and groundwater retention time under diffuse recharge

表 4 成都市水文地质分区概况

Table 4 Overview of hydrogeological zonation in Chengdu

水文地质区	承压含水层组成	H/m	地下水埋深/ m	$K/(\text{m}/\text{d})$	单孔涌水量/ (m^3/d)	补给程度
西部强富水区	第四系全新统卵石层	15~30	2~7	10~40	>2 000	较好
中部中等富水区	第四系卵石层	10~20	5~10	10~20	1 000~2 000	中等
东部贫水区	白垩系灌口组风化带			<0.02	>500	较差

的同时探究不同参数对地下水水头和平均滞留时间的影响。地铁施工区均位于富水性强的第四系地层中,渗透性强,承压含水层厚度在 10~30 m。该含水岩组由上更新统上段含泥砂砾卵石层及其之下的上更新统下段风化泥砂砾卵石层构成承压含水层主体,并与沿府、南河或河渠古道呈条带状叠置于其上的全新统砂砾卵石层共同组成区内第四系孔隙含水岩组。

成都地铁 2 号线及其地下车站均采用明挖法进行施工,地下车站和隧道等建筑进行防水和阻水处理后,减小了原地下水过水断面,从而降低了地下水的渗透流量,因此产生了屏障效应,进而改变了地下水的水头和滞留时间。研究区内平均水力坡度为 0.02~0.025,计算时取 0.02, θ 根据岩性设置为 0.10。重点关注站点为黄忠路口站、牛王庙站、牛市口站和钢管厂站。

地下车站的建设只改变构筑物附近的水头,而对区域性承压含水层的流场影响极小,因此符合侧向定水头边界条件的假设。分别根据式(4)(10)(11)(12)计算施工前后的地下水水头和平均滞留时间,进而从这两方面分析地下构筑物产生的屏障效应。计算中所需的数据和参数如表 5 所示。根据计算可以得出,黄忠路口站的地下水平均滞留时间增长值最小,为 28 d,而牛王庙站、牛市口站和钢管厂站的平均滞留时间增长值分别为 134、286、130 d。通过与实测水头的对比,发现解析解可以较好地估算地下车站建成前后的水头和平均滞留时间变化(表 6)。由计算结果可知,黄忠路口地铁站建造产生的屏障效应远远小于其他 3 个车站。该现象与等效屏障深度有关,即与地下构筑物以及承压含水层的位置和尺寸有关。由表 5 可知,黄忠路口站由于位于成都市西部强富水区,承压含水层较发育(厚度高达 37 m),因此地铁建设对承压含水层过水断面的影响较小,地下构筑物的等效屏障深度也较小,因而对地下水的屏障效应较小。其他 3 个车站均位于东部贫水区,承压含水层的厚度和渗透系数均较小,构筑物的等效屏障

表 5 计算平均滞留时间所需要的变量

Table 5 Variables required to calculate the average retention time

车站名	θ	水力梯度 $K/(\text{m}/\text{d})$	d/m	H/m	l_2/m	d_1/m	
黄忠路口站	0.10	0.02	30	16.4	37.0	190.0	0.213
牛王庙站	0.10	0.02	21	11.4	15.3	240.0	0.741
牛市口站	0.10	0.02	15	10.1	11.6	176.6	0.870
钢管厂站	0.10	0.02	15	8.1	11.9	192.6	0.681

表 6 水头及平均滞留时间的计算结果与实测对比

Table 6 Comparison of calculated and measured results of water head and average retention time

车站名	计算水头变化/ m	实测水头变化/ m	平均滞留时间变化/ d
黄忠路口站	0.03	0.02	58.27
牛王庙站	0.11	0.25	134.00
牛市口站	0.17	0.20	286.00
钢管厂站	0.13	0.23	130.00

深度较大,因而对地下水的屏障效应较大。值得注意的是,地下水水头与滞留时间对屏障效应造成的效果响应并不相同。例如,在地铁车站建成后,黄忠路口站的地下水水头差仅增加了 0.03 m,而平均滞留时间则增加了 58 d。

整个计算过程中, θ 与水力梯度是恒定的,由此推测地下水平均滞留时间的变化与渗透系数密切相关。同时,在计算过程中若将 θ 改为 0.2 后,能观察到平均滞留时间均有显著的增加(均较之前增加近 1 倍),说明 θ 对平均滞留时间的影响很大。同时也能看出,屏障效应对平均滞留时间和地下水水头两方面的影响不一致,地下构筑物的建设对水头的影响很小,但对平均滞留时间的影响很大。

在实际工程建设的水文地质勘察过程中,传统的水文地质现场试验无法直接获取承压含水层的地下水平均滞留时间,只能通过示踪试验间接推算。相比于造价高昂且耗时巨大的现场示踪实验,本文推导的解析解提供了一种快速且低成本估算地下水平均滞留时间的方法,可作为传统水文地质调查的补充手段。

4 结 论

a. 通过侧向定流量、侧向定水头和均匀面状补给 3 种边界条件下承压含水层地下水水头、滞留时间分布和平均滞留时间的解析解与数值模拟结果的对比,验证了解析解的准确性。随着承压含水层宽度和地下构筑物尺寸的增加,地下构筑物周围的水分子流动路径会出现水动力弥散现象,滞留时间分布的解析解会逐渐偏离数值解。然而,本文提出的解析解可以较好地计算平均滞留时间,且准确度不受承压含水层宽度和地下构筑物尺寸的影响。

b. 在侧向定水头和均匀面状补给边界条件下,地下构筑物增大了地下水的平均滞留时间;而在侧向定流量边界条件下,平均滞留时间相比于建造前会减小。同时,地下构筑物的建造对侧向定水头边界条件的影响更加显著。

c. 利用成都地铁 2 号线车站建造前后的含水层数据,对解析解进行计算验证,并将计算结果与实测数据进行了对比。计算结果表明,地下水滞留时间受地下构筑物的尺寸、承压含水层宽度、承压含水层的有效孔隙度以及渗透系数等多个参数的影响。同时,地下构筑物建造产生的屏障效应对地下水平均滞留时间和水头的影响表现很不一致。地下构筑物对建造区域的地下水水头和地下径流的影响较轻微,但却能很大程度地影响地下水的平均滞留时间。地下构筑物的建设将会影响地下承压含水层自身的更新能力。

参考文献:

[1] JIANG Leiwen,O' NEILL B C. Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways[J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions,2017,42:193-199.

[2] 上官子恒. 人口城市化对中国 GDP 的影响及作用机制[J/OL]. 中南民族大学学报(人文社会科学版),1-11[2024-09-02]. <https://doi.org/10.19898/j.cnki.42-1704/C.20240516.01>. (SHANGGUAN Ziheng. Impact of urbanization on China's GDP and its mechanism of action[J/OL]. Journal of South-Central Minzu University(Humanities and Social Sciences),1-11[2024-09-02]. <https://doi.org/10.19898/j.cnki.42-1704/C.20240516.01>. (in Chinese))

[3] EISWIRTH M,WOLF L,HÖTZL H. Balancing the contaminant input into urban water resources[J]. Environmental Geology,2004,46(2):246-256.

[4] 李存才. 2023 年《中国水资源公报》发布[N]. 中国财经报,2024-07-02(003).

[5] 雷升祥,李文胜,周彪,等. 城市网络化地下空间品质提升及评价指标体系[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):987-997. (LEI Shengxiang, LI Wensheng, ZHOU Biao, et al. Quality improvement and evaluation index system of urban network underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(4):987-997. (in Chinese))

[6] 安晓晓,李云燕. 基于应用场景的城市深部地下空间规划模式研究[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(3):701-709. (AN Xiaoxiao, LI Yunyan. Research on planning model of urban deep underground space based on application scenario[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024,20(3):701-709. (in Chinese))

[7] FONT-CAPO J,PUJADES E,VAZQUEZ-SUNE E,et al. Assessment of the barrier effect caused by underground constructions on porous aquifers with low hydraulic gradient;a case study of the metro construction in Barcelona,Spain[J]. Engineering Geology,2015,196:238-250.

[8] 员建峰,洪波,李宝辉. 城市地下工程建设中的环境工程地质问题的分析[J]. 中国水运(下半月),2015,15(1):122-123. (YUAN Jianfeng, HONG Bo, LI Baohui. Analysis of environmental engineering geological problems in urban underground engineering construction[J]. China Water Transport,2015,15(1):122-123. (in Chinese))

[9] PUJADES E,VÁZQUEZ-SUÑÉ E,CULÍ L,et al. Hydrogeological impact assessment by tunnelling at sites of high sensitivity[J]. Engineering Geology,2015,193:421-434.

[10] 杨思. 明挖法地铁车站工程安全风险评估研究[D]. 福州: 福建工程学院,2017.

[11] LIU Jiu, ZHANG Runqi, JING Miao, et al. Influence of biopolymer-based topsoil treatments on surface-subsurface hydrological processes: implications for protection and restoration of sandy slopes[J]. Catena, 2025, 258: 109266.

[12] LIU Jin , LU Yipin, CHE Wenyue, et al. Study on ecological restoration in engineering construction: analysis of soil rock interface coupling characteristics of slope surface[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 390: 126302.

[13] BOTTER G, BERTUZZO E, RINALDO A. Transport in the hydrologic response: travel time distributions, soil moisture dynamics, and the old water paradox[J]. Water Resources Research, 2010, 46(3): W03514.

[14] JING Miao, KUMAR R, ATTINGER S, et al. Assessing the contribution of groundwater to catchment travel time distributions through integrating conceptual flux tracking with explicit Lagrangian particle tracking[J]. Advances in Water Resources, 2021, 149: 103849.

[15] JING Miao, LU Chunhui, SUN Chaojun, et al. Assessing the effect of construction-induced consolidation on groundwater travel time distribution under unconfined conditions[J]. Hydrogeology Journal, 2023, 31(2): 275-292.

[16] VAN METER K J, VAN CAPPELLEN P, BASU N B. Legacy nitrogen may prevent achievement of water quality goals in the Gulf of Mexico[J]. Science, 2018, 360(6387): 427-430.

[17] HAITJEMA H M. On the residence time distribution in idealized groundwater sheds[J]. Hydrological Processes, 1995, 172(1-4): 127-146.

[18] LERAY S, ENGDAHL N B, MASSOUDIEH A, et al. Residence time distributions for hydrologic systems: mechanistic foundations and steady-state analytical solutions[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 67-87.

[19] LERAY S, GAUVAIN A, DE DREUZY J R. Residence time distributions in non-uniform aquifer recharge and thickness conditions- an analytical approach based on the assumption of Dupuit-Forchheimer[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 110-128.

[20] 陈茜茜, 陈建生, 王婷. 我国北方地下水年龄测定问题讨论[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 1-5. (CHEN Qianqian, CHEN Jiansheng, WANG Ting. A discussion of groundwater dating in Northern China[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 1-5. (in Chinese))

[21] 汪集旻, 陈建生, 陆宝宏, 等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong, et al. Review and prospect of isotope hydrology[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5): 406-413. (in Chinese))

[22] 余钟波, 李敏娟, 刘芸辰, 等. 基于氢同位素的河水与地下水水力交换研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 8-13. (YU Zhongbo, LI Minjuan, LIU Yunchen, et al. Study on the hydraulic exchange of river water and groundwater based on radon isotope[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020, 48(1): 8-13. (in Chinese))

[23] 翟远征, 王金生, 滕彦国, 等. 地下水更新能力评价指标问题刍议: 更新周期和补给速率的适用性[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 56-61. (ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Humble opinion on assessment indices for groundwater renewability: applicability of renewal period and recharge rate[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 56-61. (in Chinese))

[24] 杨娜, 刘九夫, 关铁生, 等. 径流过程水分滞留时间研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 24-29. (YANG Na, LIU Jiufu, GUAN Tiesheng, et al. Research progress on water residence time in runoff process[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 24-29. (in Chinese))

[25] 邱菊, 蒋勇军, 吕同汝, 等. 典型岩溶槽谷区土壤水和地下水氢氧稳定同位素对隧道建设的响应[J]. 地球科学, 2022, 47(2): 717-728. (QIU Ju, JIANG Yongjun, LYU Tongru, et al. Response of stable isotopes of hydrogen and oxygen in soil water and groundwater to tunnel construction in typical karst trough valley[J]. Earth Science, 2022, 47(2): 717-728. (in Chinese))

[26] 刘花台, 郭占荣, 袁晓婕, 等. 用镭同位素评价海水滞留时间及海底地下水排泄[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(3): 599-606. (LIU Huatai, GUO Zhanrong, YUAN Xiaojie, et al. Utility of radium isotopes for evaluating residence time and submarine groundwater discharge[J]. Earth Science, 2013, 38(3): 599-606. (in Chinese))

[27] DEKKER J M, SWEIJEN T, ZECH A. Groundwater flow below construction pits and erosion of temporary horizontal layers of silicate grouting[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(8): 2821-2832.

[28] RAATS P A C. Convective transport of solutes by steady flows II-specific flow problems[J]. Water Manage, 1977, 1(3): 219-232.

[29] VOGEL J C. Investigation of groundwater flow with radiocarbon-isotopes in hydrology[J]. Proceedings of a Symposium, 1968, 90(3): 191-212.

[30] 成璐. 成都地铁1、2号线工程主要水文地质问题分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.