

地下水储备的双重缓冲概念辨析

王旭升¹, 陈 飞², 羊 艳², 曹国亮¹

(1. 中国地质大学(北京) 水利部地下水保护重点实验室, 100083, 北京; 2. 水利部水利水电规划设计总院, 100120, 北京)

摘 要:我国的地下水储备制度建设仍处于起步阶段。地下水储备是一个长周期、低频动态过程, 建立地下水储备制度亟须解决一些关键技术问题。通过分析地下水储备维持、动用和恢复过程, 提出双重缓冲概念, 分别为缓冲水量和缓冲时间。缓冲水量反映地下水储备空间、缓冲空间组合体的地下水储存量与储备量之间关系, 综合表示为水量缓冲系数; 缓冲时间反映地下水储备动用期激发补给过程产生的供水保障时间延长效应, 综合表示为时间缓冲系数。在解释概念的基础上, 提出了评估缓冲系数的定量方法, 包括理论公式、参数集和情景模拟技术。水量缓冲系数和时间缓冲系数在理论上均大于1, 实际数值取决于水文地质条件和专用井开采地下水的方式。在以承压含水层为地下水储备空间的典型算例中, 水量缓冲系数可达200以上, 而时间缓冲系数可达20以上。缓冲效应对地下水储备动用期结束后的恢复过程也具有重要影响。关于储存量、储备量和缓冲系数等量化描述的可靠性、实用性, 还需要更广泛深入的讨论和研究。

关键词:含水层; 弱透土层; 水文地质参数; 缓冲空间; 缓冲时间; 地下水储备

Clarification of dual buffering concepts in groundwater reserve

WANG Xusheng¹, CHEN Fei², YANG Yan², CAO Guoliang¹

(1. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: China's groundwater reserve system is still in its infancy. Groundwater reserve involves a long-term, low-frequency dynamic process. The development of the groundwater reserve system urgently requires addressing several key technical issues. Based on an investigation of the maintenance, utilization, and recovery processes of groundwater reserve, this study proposes two buffering concepts: buffer water volume and buffer time. The buffer water volume reflects the relationship between groundwater storage volume and reserve volume within the combined groundwater reserve and buffer spaces, which is represented by the water volume buffering coefficient. Buffer time reflects the extension of the guaranteed water-supply duration during the groundwater reserve utilization period due to induced recharge, and this effect is comprehensively represented by the time buffering coefficient. On the basis of conceptual interpretation, quantitative methods for evaluating the buffering coefficients are proposed, including theoretical formulas, parameter sets, and scenario simulation techniques. In theory, both the water volume and time buffering coefficients are greater than 1. Their actual values depend on the hydrogeological conditions and the groundwater extraction method using dedicated wells. In typical examples in which confined aquifers are used as the groundwater reserve space, the water volume buffering coefficient can exceed 200, while the time buffering coefficient can exceed 20. The buffering

收稿日期: 2026-04-28 修回日期: 2026-08-04

作者简介: 王旭升, 水利部地下水保护重点实验室副主任, 教授, 主要从事地下水科学与工程、水文学及水资源领域的教学与研究。E-mail: wxsh@cugb.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金项目(U2443204); 水利部重大科技项目(SKS-2022043)。

effect also has an important impact on the recovery process of groundwater reserve after the utilization period. Further extensive and in-depth discussion and research are needed regarding the reliability and practicality of quantitative descriptions such as storage volume, reserve volume and buffering coefficients.

Keywords: aquifer; aquitard; hydrogeological parameter; buffer space; buffer time; groundwater reserve

中图分类号: TV213.4+P641.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)15-0044-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.15.006

推进地下水储备制度建设是落实《地下水管理条例》的基本要求。2025年6月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于全面推进江河保护治理的意见》,明确提出“建立健全国家水资源安全战略储备体系和地下水储备制度”。2026年3月,水利部、自然资源部联合印发《关于建立地下水储备制度的指导意见》,把“到2030年,基本建立地下水储备科学布局、严格管理和有效保护体系”作为主要目标。

一、地下水储备制度研究现状

近20年来,我国水资源领域对地下水储备制度的基础性问题进行了一系列探讨。柳长顺提出水资源储备体系与模式的概念,把浅层和深层地下水均纳入水资源储备范畴。钟华平提出地下水战略储备区划定、地下水战略储备量确定以及地下水战略储备区管理与储备量保护原则。左其亭等从政策法律、行政管理、工程建设、科学技术4个方面探讨了地下水储备制度的构建途径及其支撑体系。于丽丽、羊艳对地下水储备制度的关键技术进行了分析,认为需要解决储备什么(储备对象)、在哪里储备(储备区划定)、储备多少(储备量)、如何动用(动用预案)、监督管理等问题。中国地质科学院水文地质环境地质研究所牵头完成了国家主要含水层与地下水储备重点区划分的研究,划分出6大类46个主要含水层系统,筛选和圈定了38个国家级地下水储备重点区。李发鹏、孙波扬探讨了建立地下水储备需关注的若干重点问题,认为要因地制宜实施差别化的地下水储备策略。

在地下水管理实践上,一些地区已经开展了地下水储备相关探索,甚至规划出台了地下水储备的地方政策。北京市2025年初步建立起地下水战略储备制度,划分了5个地下水储备区,确定了地表、地下战略储备水量总计达到40亿 m^3 的目标。赵志江、于淑娟探讨了浙江省地下水储备体系的构建思路。马宝强等提出了构建甘肃省地下水储备制度的对策建议。江苏省在2024年发布的省级地下水管理条例中提出编制全省地

下水储备方案的要求,并在2025年部署了地下水储备布局调查分析项目。

总体而言,我国的地下水储备制度建设刚刚起步,各行业部门对地下水储备的认识还不完全统一,而且亟须研究解决一些关键技术问题。

二、地下水储备关键过程

《地下水管理条例》明确要求“除特殊干旱年份以及发生重大突发事件外,不得动用地下水储备”,以法律形式规定了地下水储备的属性。因此,地下水储备不是一般的应急物资,而是具有不可替代性的战略资源,只能在特殊情况下动用。具体而言,只有在仓储水源(以仓储形式储备的、具有规定保质期的瓶装或桶装饮用水)、地表水源和常规地下水源所形成的供水体系遭到严重损害、造成断供危机的情况下,才能动用地下水储备。这意味着地下水储备是一个长周期、低频动态过程。难以更新的深层地下水应纳入地下水储备范围进行管理。

地下水储备的总体过程,可以划分为维持期、动用期和恢复期3个阶段,分别涉及一些关键的技术环节,如图1所示。

在维持期,地下水保存在特定的含水层中,即透水性较强、具有较大空隙容量的地层,这些含水层构成地下水储备空间。图1(a)所示的情况为承压含水层,上面覆盖的地层不管是隔水层还是弱透水层,都对地下水储备产生一定的保护作用,而且弱透水层能够通过与含水层发生水量交换而发挥缓冲作用。地下水的正常储备量,通过上限水位和下限水位来表征。上限水位一般指自然状态的连续枯水年水位,或常规开发利用状态下的管控水位。下限水位是防止含水层被过度开采而诱发生态环境灾害(如严重地面沉降)的最低水位,一般应高于承压含水层的顶面,并高于储备专用井潜水泵的安装位置。

在动用期,随着地下水储备的消耗,储备空间含水层的水头(水压力)将减小,表现为专用井或观测井内的水位下降。抽取出的井水进入特殊时期开启的供水

管路系统,满足基本供水需求。这个时期需要密切关注地下水水位变化,掌握地下水储备库存量的减少趋势。而且,储备空间一定范围内的地下水将持续流向专用井,水动力传递效应引发周边地下水(包括侧向径流与垂向越流)向储备范围流动,可称为激发补给。地下水储备库存量的减少是动用期抽水消耗与激发补给叠加的结果。

在动用情景消失或地下水储备库存量达到警戒线之后,地下水储备的动用过程终止,进入恢复期。专用井或观测井内的水位在恢复期可能发生自然抬升,意味着储备库存量通过激发补给得到一定程度的恢复。如果水位自然抬升的最终稳定状态低于上限水位,或者抬升到上限水位所需要的时间过于漫长,那么就需要采取人工回补的方式恢复地下水储备,使地下水水位在预期的时间内达到上限水位。上限水位的恢复并不一定等于地下水储备的完全恢复。图1(b)展示了两条不同的恢复曲线,分别对应可逆恢复和不可逆恢复两种情况。可逆恢复曲线最终能够达到的储备库存量与动用之前的正常储备量相等,即完全可逆;不可逆恢复曲线是达到上限水位的情况下储备库存量低于动用之前的正常储备量,意味着地下水储备空间的储备能力发生了永久性损失。当储备空间存在局部发育的弱固结黏性土夹层时,动用期水位的下降可能导致塑性压缩变形(表现为地面沉降),含水层厚度永久性减小,就会出现储备能力不可逆的下降。

通过对上述关键过程的分析,可以引申出地下水储备的两个缓冲概念,分别为缓冲水量和缓冲时间。缓冲

水量反映地下水储备空间、缓冲空间组合体的地下水储备量与储备量之间关系;缓冲时间反映地下水储备动用期激发补给过程产生的供水保障时间延长效应。

三、地下水储备缓冲水量

1. 储备空间、缓冲空间与储备范围

在地下水储备动用期,直接取出的地下水来自储备空间的含水层介质。然而,水是流动的,当目标含水层的水压力下降低时,周边的弱透水层或其他地质体(例如断裂带)中的地下水将流向目标含水层。这意味着地下水储备的消耗能够得到缓冲。为了考虑这种缓冲效应,有必要在地下水储备空间的基础上,进一步把目标含水层周围的地质体考虑划入储备范围。图2给出了一个层状结构含水层、弱透水层组合结构的案例样式。其中,地下水储备空间由两个厚度不均匀的含水层构成,与弱透水层组成三维镶嵌结构。地下水储备范围包括与含水层存在密切水力联系的弱透水层地质体,在图2中垂向上界定为高程 Z_b 与 Z_t 之间的区域。在地下水储备范围内,目标含水层之外的部分称为地下水储备的缓冲空间。地下水储备空间和缓冲空间组合成三维的地下水储备范围。

2. 储量、储备量与水量缓冲系数

为了量化评估缓冲空间的作用,本文提出水量缓冲系数的概念,表示为地下水储备范围储量与储备量的比值。其中,储量与储备量分别定义如下:

储量,是储备范围全部地质体空隙(孔隙、裂隙与岩溶通道)中保存的水质量,换算为地面温度和压

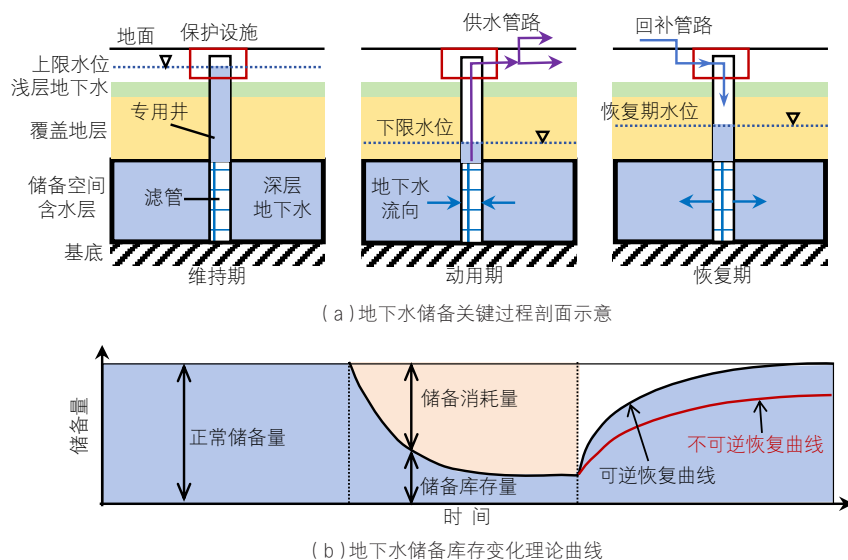


图1 地下水储备过程及关键技术环节

力环境下的水体积。储存量评估的理论公式如图3所示。在实际操作中可根据地质勘探资料情况进行适当的简化。

储备量,表示储备空间全部含水层从上限水位降低到下限水位所能释放出来的水体积。储备量评估按照潜水含水层和承压含水层分别采取不同的理论公式,如图4所示。在动用期,地下水储备库存量可评估为含水

层实际水位降低到下限水位所能释放出来的水量。

上述储存量与储备量的概念,与传统水文地质学定义的“地下水储存量”(储存资源),以及水利部《地下水月报》所评价的“地下水蓄变量”存在相同点和差异。传统地下水储存量是通过“水力释放法”来定义的,即水位(潜水)、水头(承压水)下降到一定程度所能释放出来的水体积,包括容积储存量(潜水)和弹性储存量(承压水)。其评估方法与图4所示的储备量理论公式基本一致,把上限水位替换成评估期的观测水位即可。这个概念的问题在于只能得到一个相对值,必须先说清楚下限水位才能确定数值的意义。地下水蓄变量的评估公式与图4所示潜水含水层理论公式相似,用一定时期的水位变化值替换上限水位与下限水位之差。

本文提出的储备量计算公式沿用了“水力释放法”的思路,表达现有人工方法实际能够取出的水量,然而储存量的计算真正采用“存量法”,把地质体中含有的水量全部计入,用于表达地下水储备的缓冲水量,形成一个绝对值而不是相对值。虽然地质体中相当部分水量难以被现有的人工方法利用,但是其缓冲意义不可忽视。

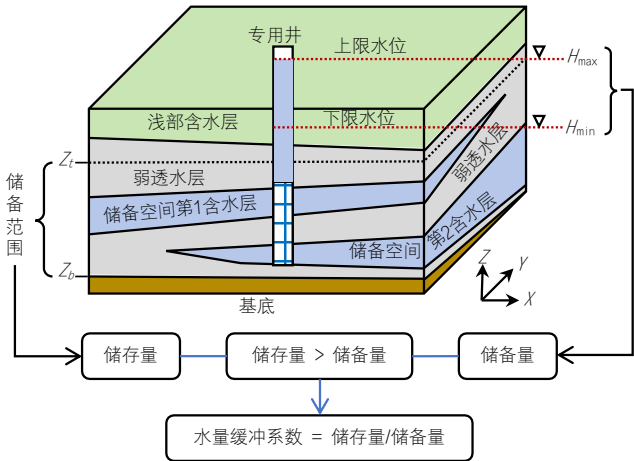


图2 地下水储备范围三维结构与缓冲系数概念示意

单位面积 储水质量 (kg/m ²)	$N_w = \int_{Z_b}^{Z_t} \rho(z)\theta(z)dz$	Z_b —— 储备范围的底部高程, m
储备范围 总水质量 (kg)	$M_w = \iint_{\Omega} N_w(x,y) dxdy$	Z_t —— 储备范围的顶部高程, m
储存量 (m ³)	$V_w = \frac{M_w}{\rho_0}$	ρ —— 地下水在含水介质中的密度, kg/m ³
		ρ_0 —— 地面温度和压力下水的密度, kg/m ³
		θ —— 含水介质的体积含水率, m ³ /m ³ ; 饱和含水介质的 θ 值为孔隙度
		Ω —— 表示储备范围的平面圈闭区

图3 地下水储存量(储备范围)评估理论公式及参数

潜水含水层储备空间		$h_{\max}$ —— 潜水含水层的上限水位, m $h_{\min}$ —— 潜水含水层的下限水位, m μ —— 潜水含水层的给水度, 无量纲 N —— 承压含水层的层数, 无量纲 j —— 承压含水层的序号, 无量纲 $H_{\max}$ —— 承压含水层的上限水位, m $H_{\min}$ —— 承压含水层的下限水位, m b_j —— 第j个承压含水层的厚度, m S_j —— 第j个承压含水层的贮水率, m ⁻¹ Ω —— 表示储备范围的平面圈闭区
单位面积潜水 储备量 (m ³)	$D_u = \mu(h_{\max} - h_{\min})$	
潜水含水层 储备量 (m ³)	$W_u = \iint_{\Omega} D_u(x,y) dxdy$	
承压含水层储备空间		
单位面积承压水 储备量 (m ³)	$D_c = \sum_{j=1}^N b_j S_j (H_{\max} - H_{\min})_j$	
承压含水层 总储备量 (m ³)	$W_c = \iint_{\Omega} D_c(x,y) dxdy$	

图4 地下水储备量(储备空间)评估理论公式及参数

3. 算例分析

地下水储备范围的储存量一般大于储备量,即水量缓冲系数(储存量与储备量之比)大于1。以河北省保定市西部应急水源地为案例进行分析。该水源地位于一亩泉的泉域范围,又被称为一亩泉水源地。本文假设该水源地南部区块34眼开采井可作为储备专用井,见图5(a),进行水量缓冲系数评估,仅用于概念分析,不代表实际的地下水储备项目。水源地含水岩组的垂向分布特征如图5(b)所示,含水层介质以砂砾石沉积物为主,弱透水层介质以粉质黏土为主,两者呈互层结构。第Ⅰ、Ⅱ含水层组赋存浅层地下水,第Ⅲ、Ⅳ含水层组赋存深层地下水。以往主要开采第Ⅱ含水层组地下水,水位曾低于0 m高程,2018年以来水位有较大幅度抬升,现状水位高程接近18 m。取水源地二级保护区圈闭区域作为地下水储备范围,垂向上包含埋深150 m以内的全部含水岩组。

对于上述地下水储备范围,表1根据当地水文地质条件和介质的经验参数,划分出潜水、承压水储备空间,分别代表浅层和深层地下水储备,给出了水量缓冲系数的概略计算结果。其中,浅层地下水储存量为1.67亿 m^3 ,而储备量为0.25亿 m^3 ,水量缓冲系数达到6.8;深层地下水储存量为2.12亿 m^3 ,但储备量仅有约95万 m^3 ,水量缓冲系数超过200。

在这个算例中,潜水和承压水储备空间对应的地下水储存量相差不到2倍,但承压水储备量只有潜水储备量的3.9%,而其水量缓冲系数为潜水的近33倍。这一方面说明以潜水含水层作为储备空间可以更充分地利用地下水储存量,另一方面也说明以承压含水层

为储备空间,地下水储存量所起到的缓冲作用更大。该算例反映了地下水储备的规律性特征:以承压含水层为储备空间的水量缓冲系数,一般显著大于以潜水含水层为储备空间的水量缓冲系数。

四、地下水储备缓冲时间

1. 概念说明

地下水储备的目标是满足特殊干旱年份以及发生重大突发事件时期的基本供水需求。相对一般的应急事件需要动用地下水储备的事件发生概率更小。尽管如此,每个地下水储备工程的规划设计都期望能够最大程度缓冲特殊事件的冲击,提供更长时间的供水保障,并在停止动用之后能够快速恢复。因此,地下水还有缓冲时间的概念。

如果以保障一定数量人口的基本生活用水作为目标,则地下水储备的最短保障时间可以按下式计算:

$$t_{\min} = W_g / (X_w P_c) \quad (1)$$

式中, $t_{\min}$ 为最短保障时间,d; W_g 为地下水储备量, m^3 ,是地下水储备范围潜水含水层与承压含水层储备量之和; X_w 为地下水储备动用期的人均需水定额, m^3/d ; P_c 为人口数量。式(1)中忽略了供水管路系统的漏失量。

地下水储备空间在动用期接受周边地质体对含水层的激发补给,用式(1)计算的时间并不代表地下水储备所能达到的最大缓冲时间。如果激发补给的水量已知,则地下水储备的缓冲时间可评估为:

$$t_{\max} = (W_g + W_r) / (X_w P_c) \quad (2)$$

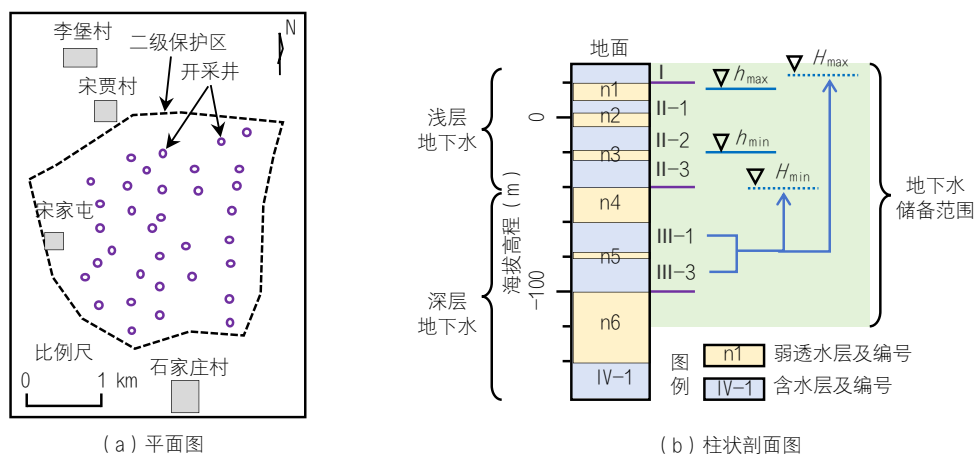


图5 河北省保定市西部应急水源地南部区块开采井平面分布及含水岩组简化剖面

表1 河北省保定市西部应急水源地南部区块算例水量缓冲系数评估

基础数据					
变量名称	单位	数值	变量名称	单位	数值
储备范围面积	km ²	8.06	包气带平均含水率	/	0.15
储备范围体积	km ³	1.21	潜水含水层给水度	/	0.08
含水层介质孔隙度	/	0.29	承压含水层贮水率	m ⁻¹	5.0×10 ⁻⁵
弱透水层介质孔隙度	/	0.36	地面环境水密度	kg/m ³	998
潜水储备空间(第Ⅰ~Ⅱ含水层组)数据					
变量名称	单位	数值	变量名称	单位	数值
包气带厚度	m	12	储水总质量	亿kg	1667.5
包气带水密度	kg/m ³	998	储存量	万m ³	16 708.8
饱和弱透水层总厚度	m	21	上限水位 $h_{\max}$	m	18
弱透水层平均水密度	kg/m ³	1000	下限水位 $h_{\min}$	m	-20
饱和含水层总厚度	m	39	储备量	万m ³	2450.2
含水层平均水密度	kg/m ³	1002	水量缓冲系数	/	6.8
承压水储备空间(第Ⅲ含水层组)数据					
变量名称	单位	数值	变量名称	单位	数值
弱透水层总厚度	m	43	储存量	万m ³	21 231.1
弱透水层平均水密度	kg/m ³	1003	上限水位 $H_{\max}$	m	24
含水层总厚度	m	37	下限水位 $H_{\min}$	m	-40
含水层平均水密度	kg/m ³	1003	储备量	万m ³	95.4
储水总质量	亿kg	2118.9	水量缓冲系数	/	222.5

式中, $t_{\max}$ 为最大缓冲时间, d; W_r 为激发补给量, m³。然而, 受到地下水运动规律复杂性的影响, 激发补给的形成与水文地质条件、开采井布局、开采流量都有关系, 其随时间的变化并不能用简单公式进行预测, 一般需要开展情景数值模拟进行评估。

比值 $t_{\max}/t_{\min}$ 称为时间缓冲系数, 其与水量缓冲系数不是正比关系, 但存在一定的联系。

2. 算例分析

通过河北省衡水市区西南部应急水源地案例分析地下水储备的缓冲时间。该水源地的开采井分布在滏阳新河南岸地区(见图6), 实际使用开采井27眼, 分为9组, 每组3眼开采井分别对应不同的目标层位, 如图7中的#1、#2和#3滤管所示, 其中#1、#2滤管开采第Ⅲ含水层组, #3滤管开采第Ⅳ含水层组。本文假设该水源地可作为衡水市地下水储备场所, 仅用于概念分析, 不代表实际地下水储备项目。以井群为中心划分长12 km、宽3 km的矩形区作为储备范围, 垂向上储备范围限定为埋深140~480 m的含水岩组。在特殊时期为衡水

市桃城区、冀州区城乡约100万人供水, 采用《河北省用水定额》(DB13/T 5450.1—2021)确定的城镇居民用水定额范围(每人每天50~140 L)最低值作为特殊时期的供水定额, 即每人每天0.05 m³, 测算供水需求为5.0万m³/d, 加上8%的安全系数(考虑管路耗损等因素), 设计取水总量为5.4万m³/d, 单井设计开采量为2000 m³/d。

衡水市经历了长期的深层地下水超采, 上述水源地深层地下水的水位埋深曾经增加到80~90 m, 2019年以来水位有所抬升, 目前大致处于埋深60~70 m范围。深层地下水水位下降导致含水层(砂土)和弱透水层(黏性土)压密, 在衡水地区产生了地面沉降。这种压缩变形基本是不可逆的, 引起水文地质参数的永久性变化, 孔隙度、渗透系数、贮水率均减小。本文初步在水源地勘察经验基础上, 将储备范围的主要参数调小后进行粗略评估: 含水层介质的孔隙度0.26, 水平方向渗透系数6 m/d, 贮水率1.0×10⁻⁵ m⁻¹; 弱透水层介质的孔隙度0.33, 水平方向渗透系数0.05 m/d, 贮水

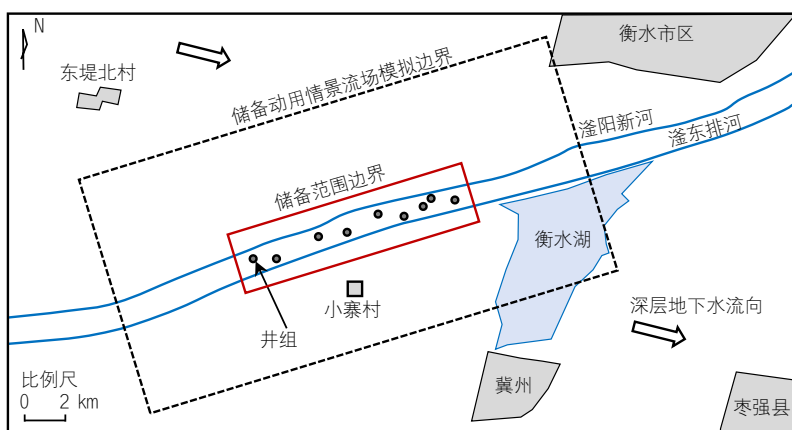


图6 河北省衡水市区西南部应急水源地开采井分布

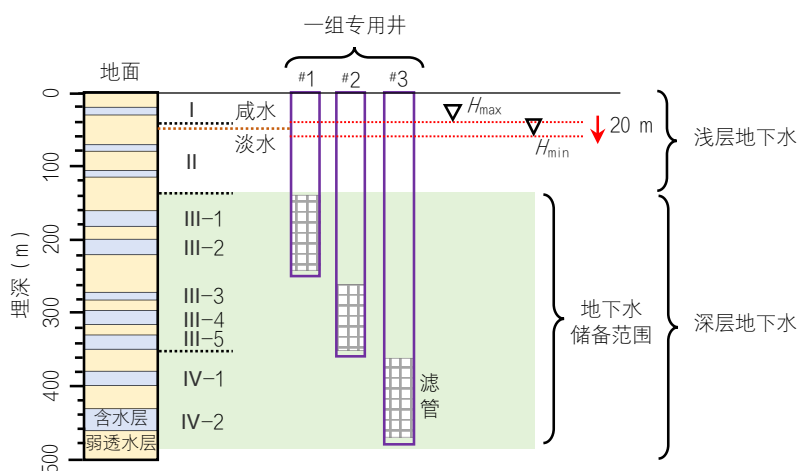


图7 河北省衡水市区西南部应急水源地含水岩组简化剖面

率 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 。假设深层地下水埋深能恢复并维持在40 m,将其作为上限水位,而下限水位根据深层地下水的临界水位取埋深60 m,即允许最大水位降幅为20 m。进一步取深层地下水和地面环境的水密度分别为 1003 kg/m^3 和 998 kg/m^3 ,计算得到储备范围的总储量达到35.8亿 m^3 ,而储备量仅有100.8万 m^3 ,水量缓冲系数高达3556。把数据代入式(1),得到 $t_{\min}=18.7 \text{ d}$,即地下水储备能直接保障不到1个月的供水。

为了确定时间缓冲系数,开展地下水储备动用情景的三维非稳定流数值模拟。模拟范围超过地下水储备范围,以评估地下水储备动用期获得的激发补给。在水平方向将模拟范围扩展为长24 km、宽12 km的矩形区(见图6),沿边界线设置地下水动力学第三类边界,以评估侧向径流补给作用。垂向上把第II含水层作为模型的顶部边界,将其水位固定在埋深20 m处(承压水状态),以评估第II含水层组对深层地下水的越流补给作用。模拟工作采用地下水通用模拟程序

MODFLOW完成,模型网格水平分辨率100 m,垂向上划分为12层,总计34万多个单元。设专用开采井滤管段直径30 cm,潜水泵安装在埋深70 m处,井中水位通过对MODFLOW模拟结果进行校正获取。其他模型细节在此不赘述。

模拟得到动用期深层地下水漏斗中心#3井(对应第IV含水层组)的水位变化曲线,如图8所示。结果表明:动用期持续抽水达485 d(约1.33 a)后,井中水位降至下限值(埋深60 m),因此最大缓冲时间为 $t_{\max}=485 \text{ d}$ 。时间缓冲系数为 $t_{\max}/t_{\min} \approx 26$,远小于水量缓冲系数(3556)。动用期抽取地下水量2619万 m^3 ,用式(2)反算激发补给量约为2518万 m^3 ,主要来自于储备范围弱透水层释放、周边深层地下水的侧向流入以及第II含水层组向下越流补给。

进一步对恢复期进行数值模拟。结果表明:停止开采后井中水位初期快速抬升,越到后期抬升速率越小,恢复1.7 a后水位总抬升幅度只有15 m。为此,

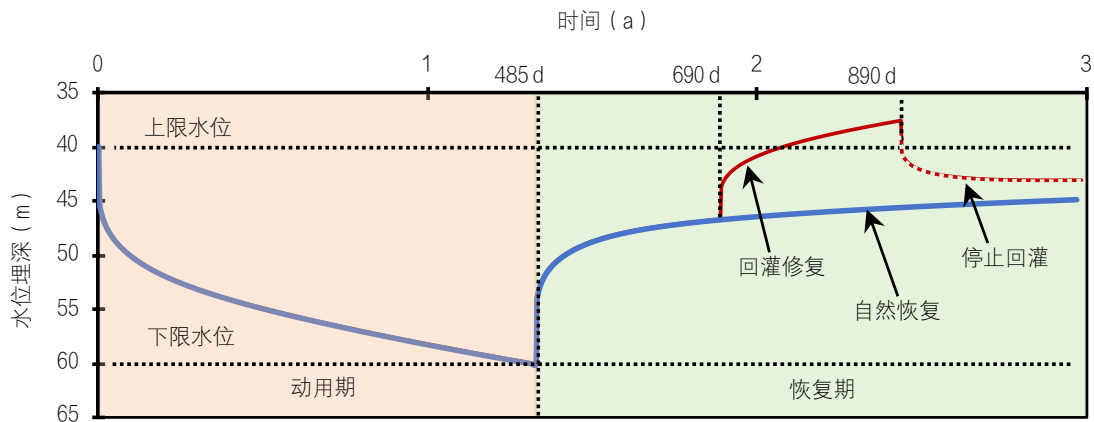


图8 #3井水位变化曲线

在自然恢复205 d后采取回补行动，通过27眼专用井持续回灌200 d，单井回灌量 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。模拟结果表明，井中水位加快抬升并超过上限水位，埋深减小到37.6 m。但是，只要停止回补，井中水位又开始回落，因为回补到含水层的水量，在水力梯度作用下进入尚未完全恢复的弱透水层中，发生了损耗。这200 d回补的水量总计只有 540 万 m^3 ，不足以弥补弱透水层在动用期释放的水量。如果立即再遭遇一个特殊干旱时期，需要动用地下水储备，那么最大缓冲时间将小于485 d。这也是大尺度地下水系统响应过程十分缓慢的一种表现。

以上特殊情景的模拟结果包含一些假设性条件，例如3个开采层位的抽水强度保持一致。如果对专用井的开采量分配方式进行优化，可增大时间缓冲系数，缩短完全恢复所需时间。总之，地下水储备的最大缓冲时间和动用之后的恢复时间，不仅取决于储备空间的水文地质参数，还取决于储备范围含水介质状态、边界属性、专用井布局、抽水强度变化和人工回补等多种条件。

五、缓冲概念对地下水储备制度的作用

地下水储备制度的实施，需要科学掌握地下水赋存和运动的规律，采取合理有效的技术手段实现地下水储备的维持、动用和恢复等关键过程管控，满足特殊干旱年份及发生重大突发事件时的基本供水需求。根据本文的探讨结果，建议在制度层面关注以下几个环节。

地下水储备的布局规划需要考虑缓冲作用，建议把水量缓冲系数、时间缓冲系数或其他能够反映缓冲效应的因素纳入规划评价指标体系。在规划储备范围

时，不能仅考虑含水层的富水性，还必须厘清含水层周边弱透水层等地质体的特性及其能够起到的缓冲作用。在评价含水层供水保障能力时，不宜直接把储备量等价于供水保障能力，应通过对时间缓冲系数的计算，提高供水能力评价的准确性。

地下水储备动用工程的设计和管理需要考虑缓冲作用，建议把对激发补给和最大缓冲时间的评价作为地下水储备动用工程设计的必要步骤。设计工作应该对地下水储备动用期间含水层激发补给过程的复杂性有足够的认识，一般需要建立研究范围超过储备范围、具有多种专用井布局和动用情景的地下水流数值模型，通过模拟预测的方式得到不同情景的时间缓冲系数。在此基础上制定有利于提高地下水储备供水保障能力的工程管理措施。

地下水储备的保护需要考虑缓冲作用。地下水储备的监测不能仅部署在储备范围和目标含水层，应把具有激发补给作用的相邻含水层、弱透水层纳入监测体系。动用之后，地下水储备的回补水量在工程设计上不能仅用于恢复储备量，还要用于恢复缓冲功能。建议加强地下水储备缓冲效应的基础理论和案例研究，形成相关的技术标准，提高地下水储备保护的科技水平。

六、结论与展望

地下水储备过程可分为维持期、动用期和恢复期3个阶段。地下水储备范围包括储备空间的含水层介质，及其周边地质体构成的缓冲空间。对储备空间-缓冲空间水力联系及动用期激发补给的作用开展分析，结果表明仅用地下水储备量及其所评估的供水保障时间不足以代表地下水储备所能发挥的最大功能。由此，形成了双重缓冲概念，即缓冲水量和缓冲时间，分别用

水量缓冲系数与时间缓冲系数来定量表征。

我国的地下水储备制度建设仍处于起步阶段,本文提出双重缓冲概念是对地下水储备问题的一种技术性探讨。关于储存量、储备量和缓冲系数等量化描述的可靠性、实用性,还需要更广泛深入的讨论和研究,形成更加完善的定量分析体系。如何把缓冲概念有效地用于地下水储备制度,是有待进一步探究解决的问题。

参考文献:

- [1] 柳长顺. 关于建立我国水资源战略储备体系的探讨[J]. 水利发展研究, 2008(2): 20-25+81.
- [2] 钟华平. 地下水战略储备研究探讨[J]. 中国水利, 2021(3): 34-36.
- [3] 左其亭, 邱曦, 马军霞. 地下水储备制度构建及关键问题研究[J]. 水利发展研究, 2022, 22(3): 11-15.
- [4] 于丽丽, 羊艳. 地下水储备制度技术问题探讨[J]. 中国水利, 2023(11): 60-63.
- [5] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 等. 中国国家主要含水层与地下水储备重点区研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2024.
- [6] 李发鹏, 孙波扬. 建立地下水储备需关注的若干重点问题[J]. 水利发展研究, 2025, 25(8): 87-92.
- [7] 北京市水务局, 北京市财政局, 北京市发展和改革委员会, 等. 关于印发《北京市地下水超采综合治理实施方案(2023年—2025年)》的通知: 京水务地〔2023〕6号[A/OL]. 2023-07-06. https://swj.beijing.gov.cn/zwgk/2024zcwj/202406/t20240618_3719360.html.
- [8] 赵志江, 于淑娟. 浙江省建立地下水资源战略储备体系研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 50-51.
- [9] 马宝强, 王潇, 马建源, 等. 甘肃省地下水资源储备制度构建对策建议[J]. 中国水利, 2023(14): 44-47.
- [10] 王大纯, 张人权, 史毅虹. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [11] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 6版. 北京: 地质出版社, 2011.
- [12] 水利部信息中心. 《地下水动态月报》合订本: 2023年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- [13] 魏世博, 贾茂平, 吴初, 等. 保定市区西部地下水循环规律及一亩泉成因研究: 来自水化学、同位素和地下水位动态的证据[J]. 地学前缘, 2026, 33(2): 525-534.
- [14] 张兢浩, 朱宏鹏, 倪雪丽, 等. 保定市城区供水安全保障方案分析[J]. 河北水利, 2023(5): 28-30.
- [15] 李春欢, 任磊, 姜纪沂, 等. 基于地下水数值模拟的保定市应急供水水源地保护区划分[J]. 防灾科技学院学报, 2023, 25(1): 59-67.
- [16] 赵忠义. 衡水市应急供水水源地研究[J]. 水资源研究, 2011, 32(3): 23-24.
- [17] 吴宝利, 吴延芳, 吕杨, 等. 衡水市地下水井群取水与输水应急工程设计[J]. 中国给水排水, 2014, 30(16): 65-67.
- [18] 程伟, 李克艳, 付银环, 等. 华北平原深层地下水位埋深演变特征及驱动机制: 以衡水市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2026, 24(2): 323-333.
- [19] 韩尚麒, 陆垂裕, 陆文, 等. 基于时序InSAR的衡水市地面沉降与深层地下水关系研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2026, 24(3): 343-356.
- [20] 石建省, 李国敏, 梁杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527-534.
- [21] Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C, et al. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process: Open-File Report 00-92[R]. 2000.

责任编辑 田灵燕