

文章编号:0559-9350(2006)05-0613-06

地下水库的概念和设计理论

李旺林^{1,3}, 束龙仓², 殷宗泽¹

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水资源环境学院, 江苏 南京 210098;

3. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013)

摘要:本文介绍了地下水库的基本概念,提出了地下水库的储水介质分类法。在完善地下储水空间和水源两个基本建库条件的基础上,补充了地下水库的可持续、环境和生态3个建库条件。文中以王河地下水库为例,提出和介绍了地下水库的动态设计法,并认为地下水库的基本设计理论包括6个方面:地下水库建库理论、地下水水文学理论、地下水库回灌和开采理论、地下水库建筑物设计理论、地下水库环境保护设计和环境影响评价、地下水库经济效益分析和评价。

关键词:地下水库;储水介质分类法;建库条件;动态设计法;设计理论

中图分类号:P641.2

文献标识码:A

人们在利用地下水的初期,曾过度开采地下水,并造成地下水位的大幅下降,产生大面积的地面沉降,由此引发了一系列的问题。于是人们就开展了地下水人工补给的研究,并设想兴建地下水库。1972年日本在长崎县野母崎町桦岛建成了世界上第一座地下水库;1975年河北省南宫市也兴建了我国第一座地下水库,使地下水库由设想变为现实。近年来,我国北方地区为解决干旱和海水入侵问题,进行了北京西郊地下水库的回灌试验,兴建了山东王河等不少地下水库,使地下水库成为一类重要的蓄水水利工程。然而地下水库的理论落后于实践,尤其缺乏深入研究地下水库的设计理论。本文在总结地下水库建设成就的基础上,探讨了地下水库的概念,提出了地下水库的分类方法、建库条件和动态设计法,初步构造了地下水库的设计理论框架。

1 地下水库的基本概念

国际上地下水库(groundwater reservoir)是一个水文地质学术语,地下水库与地下含水层(aquifer)具有相似的意思。我国早期的水文地质学中,没有地下水库的概念,只有含水层、含水构造等术语,1993年的水文地质术语中,将地下水库定义为地层中能储存外来补给水源又便于开发利用的地下储水层。

我国学者提出的地下水库定义有:(1)林学钰^[1]提出地下水库是一个便于开发和利用地下水的储水地区,具有多种功能,包括水的供给、储存、混合和输送;(2)赵天石^[2]提出地下水库是利用地壳内的天然储水空间,储存水资源的一种地下水开发工程;(3)杜汉学^[3]2002年提出地下水库就是指存在于地下的天然大型储水空间,并认为为便于社会接受,将一些地区的厚大含水层或大型储水构造应进一步命名为“地下水库”。

可见目前仍未将地下水库和地下含水层、储水构造的概念严格地区别开来,赵天石^[2]虽然将地下水库看作地下水开发工程,但其他大部分人将地下水库的概念限制在水文地质学的范畴内,且时常有人将地下水库和地下含水层混为一谈。地下水库不同于地下含水层,在于人为地干预了地下水流的天然调

收稿日期:2005-07-12

基金项目:水利部科技创新项目(SCX2003-5)

作者简介:李旺林(1964—),山西榆社人,博士生,研究员,主要研究方向为岩土工程、水工结构和地下水库。E-mail: cswlw@jmc.com

节能力和扩大了地下含水层的蓄水能力。笼统地将大型储水构造命名为“地下水库”是不科学的,仿照地表湖泊,可将天然的大型储水构造命名为地下湖。

地下水库是利用天然地下储水空间兴建的具有拦蓄、调节和利用地下水流作用的一种特殊的水库。它包含 3 层意思:(1)地下水库位于具备一定条件的天然的地下储水空间中,天然地下储水空间指地下储水构造,由岩体和松散堆积层中的孔隙、裂隙和溶隙组成;(2)强调地下水库具有人为地拦蓄和调节地下水流的作用;(3)指明地下水库是一种将水存放于地下的特殊的水库,是一种新型的蓄水水利工程。

在谈到地下水库的同时,应注意地下水库与地下水人工补给的区别。地下水人工补给只是地下水资源被超采后的一种被动的补救措施,是单纯的增加地下水资源的储量。

2 地下水库基本分类的探讨

2.1 我国目前的地下水库分类和存在问题 我国目前的地下水库分类有两种:(1)文献[1]根据工程构筑形式将地下水库分为有坝、无坝和混合类型三类;(2)文献[2]根据地下水库的介质、地貌成因、位置和人为开采情况将辽宁省的地下水库分为调蓄型、开采漏斗型、河谷型、陆地岩溶型及滨海岩溶型 5 种。

文献[1]分类比较直观、简单,可以清楚地反映有无地下坝,代表了当时地下水库分类的观点,但由于当时建设的地下水库较少,它无法恰当地概括当今新出现的地下水库,也无法反映地下水流的特征,而地下水流的特征决定着地下水库回灌和开采工程的布置等;文献[2]分类具有地方特色,但分类依据较多,且无法概括所有的地下水库。随着地下水库建设的发展,目前的分类方法已无法满足地下水库交流和实践的需要,需要进一步研究能够反映地下水库本质特征的分类方法。

2.2 地下水库的储水介质分类法

2.2.1 储水介质分类法 储水介质分类法是根据储存地下水载体的不同进行地下水库分类的一种方法。利用储水介质进行地下水库分类,主要有以下理由:(1)储水介质可以反映地下水贮存形式的差别及地下水流运动特征和规律的不同;(2)储水介质影响地下水库建筑物的布置。由表 1 可以看出不同储水介质的地下水库具有十分明显的本质差别,因此说储水介质能够区别不同类型的地下水库的主要特征,建议推荐储水介质分类法。

表 1 地下水库的主要特征和区别

项目	松散介质地下水库	裂隙介质地下水库	岩溶介质地下水库
储水空间	松散介质中的孔隙	断裂岩层中的裂隙	岩溶中的溶隙
含水层分布	比较均匀	取决于断裂构造	取决于岩溶构造
水流特性	孔隙渗流	裂隙渗流	裂隙渗流、管道流、明流
地下坝截渗或挡水方式	采用各种方式	采用灌浆的方式	采用灌浆方式(裂隙岩溶)或筑坝方式(地下河岩溶)
回灌工程布置	无限制条件	受限于断裂构造	无回灌(地下河岩溶), 取决于断裂构造(裂隙岩溶)
回灌堵塞问题	存在	未发现	未发现(裂隙岩溶),无(岩溶地下河)
开采工程布置	无限制条件	受限于断裂构造	受限于岩溶构造
水库功能	供水、防洪、防海水污染、 恢复地下水生态等	供水、防洪等	供水、防洪、发电、航运等
环境地质问题	土壤次生盐碱化等		淹没等

2.2.2 储水介质分类表 根据储水介质的不同可进行地下水库的一级分类。在同一类储水介质的地下水库中,也存在着个性上的差异,由此进行二级分类。如松散介质地下水库的主要差别在于有无地下坝,岩溶介质地下水库的主要区别在于岩溶构造的不同等。储水介质分类法详见表 2,应说明的是随着地下水库建设的发展,储水介质分类法也会得到补充和完善。

2.3 其他的分类方法 管理分类法是按地下水库有效库容 V_a 的大小进行分类的一种方法,它将地下水库分为大(1)型($V_a \geq 1 \times 10^9 \text{m}^3$)、大(2)型($1 \times 10^9 > V_a \geq 1 \times 10^8 \text{m}^3$)、中型($1 \times 10^8 > V_a \geq 1 \times 10^7 \text{m}^3$)、小

(1)型($1 \times 10^7 > Va \geq 1 \times 10^6 \text{m}^3$)、小(2)型($1 \times 10^6 > Va \geq 1 \times 10^5 \text{m}^3$)五类地下水库。“有效库容”指地下水库中参与地下水调节的最大库容。与地面水库不同,地下水深度可能超过几百米,深层地下水所占的库容有可能成为库容的主体,而参与调节的库容有限,因此用总库容难以真实地反映地下水库的实际规模。管理分类法的优点就在于能够根据水库的大小进行分级管理。

埋藏分类法是根据地下水埋藏条件进行分类的一种方法,它将地下水库分为潜水、承压水和潜水—承压水混合地下水库三类。埋藏分类法的优点在于了解地下水位的特征和回灌、开采工程的特点。

表2 地下水库储水介质分类法

一级分类	二级分类	工程实例
松散介质地下水库	有坝	王河地下水库、黄水河地下水库 南宮地下水库,大庆地下水库
	无坝	
裂隙介质地下水库	有坝	马官地下水库
	无坝	
岩溶介质地下水库	地下河及管道岩溶	傅家桥地下水库
	裂隙岩溶	
混合介质地下水库	松散与岩溶介质	傅家桥地下水库
	裂隙与岩溶介质	
	松散与裂隙介质	

3 地下水库的建库条件

3.1 地下水库的建库条件 建库条件指建立地下水库所需要具备的最基本的条件。目前一般考虑两个最基本的建库条件,即天然地下储水空间和水源。此外,作者认为还必须考虑可持续条件、环境条件和生态条件,特别是环境条件有时会成为建库的决定因素。

地下储水空间中的孔隙、裂隙和溶隙构成地下水库的库容,地下储水空间常指各种含水构造,如冲洪积扇、地下岩溶等。地下水库库区由库区边界所围成的相对封闭的地下储水空间组成,库区边界包括进水边界、泄水边界及由地下分水岭、不透水带或人工地下坝组成的隔水边界。

水源是形成地下水库的决定性条件。水源通常指通过本流域或跨流域引来的没有污染的地下水、地表水,以及中水、矿坑排水等。地下水库最主要的特征就是实现了人工调节地下水流,它包括三方面的调节措施:一是通过建造地下坝抬高地下水位,截住和多蓄地下水;二是通过人工入渗补给地下水,增强地表水转化为地下水的能力;三是通过开采地下水,预留地下蓄水空间,相应地增大地下水的蓄水量。

环境因素是决定地下水库能否兴利的重要因素,它包括两方面的因素:一方面指库区污染和回灌水等对地下水水质的影响;另一方面指建库后的地下水位、水质是否会带来不利的环境问题,如地下水位的反复升降是否会引起大范围的地面沉降等。

可持续条件是指建立地下水库不是一次性的,应满足可持续发展的要求。这要求地下含水层现在和将来都不会因兴建地下水库丧失自己的使用功能。

生态条件指建立地下水库是否会对植物、生物的生存带来不良的生态问题。

3.2 地下水库储水空间的基本要求 为能满足地下水库调蓄地下水的功能,地下水库储水空间应满足4个基本条件。(1)库容条件。储水空间必须提供足够的库容,同时应具有充分的连通性,保证地下水在整个库区范围内具有良好的流动性;(2)水量交换条件。储水空间必须满足地表水和地下水快速进行水量交换的条件,即需要天然储水空间本身具有或通过工程措施能够达到足够的渗透性;(3)可利用条件。储水空间必须满足可利用、经济开采地下水的要求,这要求含水层的埋深适宜;(4)封闭性条件。储水空间的底部应存在相对不透水层,除进水、出水边界外,储水空间的四周边界应相对封闭或通过工程措施使之相对封闭,库区不存在无法控制的导水性断裂,以避免过量的渗漏。

4 地下水库设计理论

4.1 地下水库动态设计法

4.1.1 地下水库动态设计法的概念 从已建的地下水库来看,绝大部分都采用水均衡法进行地下水的调蓄分析和计算,然后进行地下水库设计。这种方法最大的缺陷是无法反映地下水库的实际水位,影响了地下水库设计的可靠性。目前虽有利用地下水动力学原理进行地下水动态分析的研究,但在地下水库设计中还没有体现地下水动力学的方法。本文在水均衡法和地下水动态分析的基础上,提出地下水库的动态设计法。

地下水库动态设计法的基本原理是:首先利用水均衡法进行地下水的调蓄分析,初步估算地下水库的特征参数和回灌规模;然后利用地下水动力学的方法进行地下水的动态调蓄分析,以库区内降落漏斗(或地下水丘)以外的地下水位的平均值作为代表性的地下水位,并考虑库区最低地下水位对地下水调蓄的影响,从而确定地下水库最终的特征水位和库容,确定开采和回灌设施的位置、数量、开采能力和回灌能力,进行地下水库建筑物的设计。

地下水库动态设计法的优点:(1)可以预报开采过程中地下水位降深的空间分布和随时间的变化,真实地反映实际的地下水位和库容。(2)“考虑库区最低地下水位对地下水调蓄的影响”的含义是允许库区内某点的地下水位在一定时段内低于最低设计水位,但该点在整个时段内的平均地下水位应不低于最低设计水位;否则应调整回灌、开采点的位置和能力,再进行地下水调蓄分析,直至满足要求。

4.1.2 地下水库动态设计法的基本方法 下面结合王河地下水库的设计,介绍地下水库动态设计法的基本方法。

(1)明确建库的目的和论证建库的必要性。王河地下水库位于山东省莱州市王河下游,是一座松散介质地下水库,建库的目的是利用流失的地下潜流和遗弃的地表洪水,以弥补地表水资源的不足,满足工农业生产和城市供水的需要,防止海水入侵。

(2)选址和选型。①选址。分析拟选库区是否满足5个建库条件,如果不满足,就要分析通过工程措施可否满足,否则应另选库址;最后通过方案对比,选择最佳库址。王河地下水库的储水空间为砾质粗砂,分布3~4层,总厚度5~16m,砂层较为连续,上下层水力联系密切。库底由片麻岩和花岗岩组成隔水底板,库区东、西北边界由岩浆岩组成不透水边界,北、西边界和部分东边界由松散砂层组成透水边界(拟建地下坝截渗),南边界由龙王河地下水分水岭形成相对隔水边界,东南边界是补给边界。王河从东南进入库区,从正北流出库区,河水未污染,汛期有大量遗弃的洪水,是主要补给水源。此外,该库区还满足其它的建库条件,是比较理想的地下水库库址。②选型。根据储水介质、地下水分布和埋藏条件,可知王河地下水库是一座潜水、有坝松散介质地下水库。

(3)调节计算和工程规划。①初步的调节计算。利用水均衡法进行地下水量的调蓄分析,初步估算地下水库的特征参数和回灌规模。经31年逐月调节计算,在每年人工回灌补给量为1 180万 m^3 时,王河地下水库最高运行水位1.0m,最低水位-9.0m,总库容5 693万 m^3 ,设计调节水位为-4.84m时,设计调节库容2 080万 m^3 ,相应工业及生活供水保证率为99.7%,农业灌溉供水保证率为75%。②工程规划。根据调蓄分析的成果和工程需要,以及地下储水空间、水源、地下水分布特点,确定地下截渗工程、回灌工程和开采工程的位置、类型和规模。王河地下水库地下坝包括西坝、北坝和副坝,回灌工程包括河道地下回灌工程(含渗井、渗渠)、渠道地下回灌工程(渗井、回灌坑)和河道表面蓄水入渗工程(西由闸、院上闸和过西橡胶坝),开采工程包括农用井和水源地井群,监测系统包括建筑物监测和库区地下水位、水质监测。工程规划详见图1。③详细的调节计算。在工程规划的基础上,利用地下水动力学的方法,考虑库区实际地下水位,进行详细的调节计算,校核初步调节计算的成果,最终确定工程规模、补给量和开采量,以及地下水库的特征水位和特征库容。通过地下水动力学分析可知,王河地下水库尹家水源地的最低地下水位为-11.5m,超过了允许设计最低水位,但多时段平均的最低地下水位约为-6.2m,仍高于库区最低设计水位,说明初步调节计算的成果基本合理,可以采用。

(4)工程设计。根据工程规划进行王河地下水库各种建筑物的设计,进行环境保护设计和环境影响评价、经济效益分析和评价,本文就不再详细介绍了。

4.2 地下水库的设计理论框架 通过上述分析可知,松散介质地下水库设计理论框架应包括:(1)地下水库的建库理论。研究适宜建造地下水库的储水构造、水源,以及环境、生态和可持续发展条件,选择最

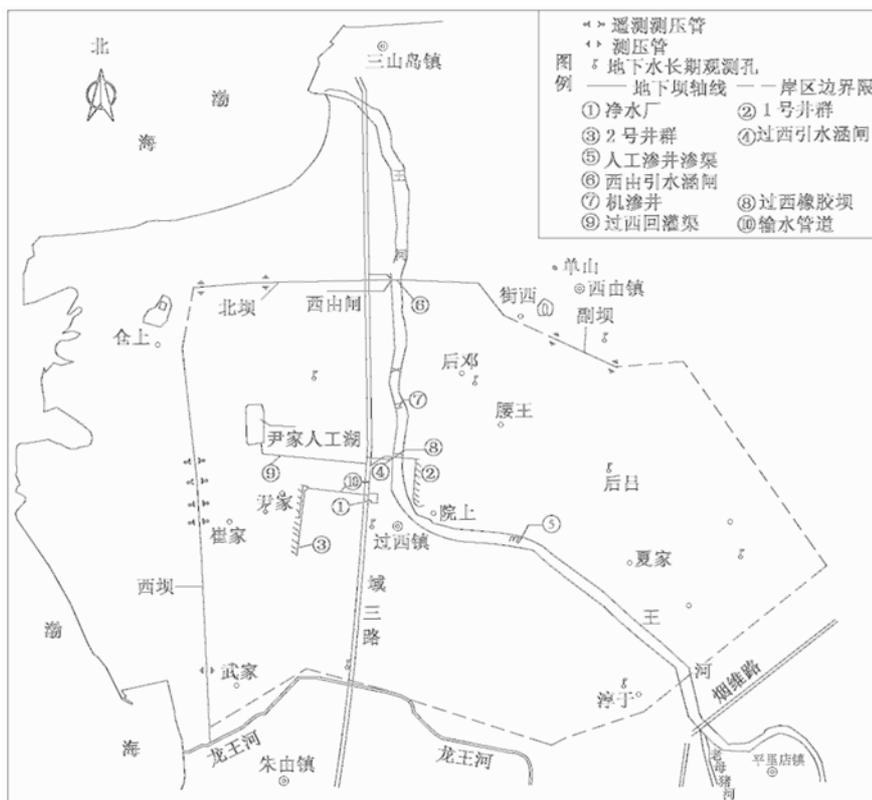


图1 王河地下水水库工程布置

佳的库址。(2)地下水水文学计算理论。主要研究地下水的补给、径流和排泄条件,地下水资源的调节计算和评价,地下水库和地面水库的联合调度,地下水的动态分析和优化管理模型等。(3)地下水回灌和开采理论。回灌理论研究地下水回灌的机理、回灌量计算、优化布置、回灌水的堵塞和水质处理等。开采理论研究地下水开采的机理、开采量计算和优化布置等。(4)地下水建筑物设计理论。研究地下水库中各种建筑物的设计理论和设计方法,目前主要借鉴工程力学、工程地质学等基础学科理论和相应学科建筑物的设计理论,另外还需进行地下水库特有建筑物的设计研究。主要内容包括:①地下截渗工程,即地下坝;②地表水回灌工程,主要指渗井、渗渠、回灌池(坑)和其它形式的入渗建筑物;③地下水开采工程,主要指开采井和集水廊道等;④地表水拦截工程,主要指闸、堰、坝等挡水建筑物;⑤地下水泄水工程,主要用于排泄库区内多余地下水和残留物等;⑥地表水处理工程;⑦地表排污工程;⑧潮水拦截工程;⑨库内残留咸水体的处理工程;⑩地下水监测设施等。(5)地下水库环境保护设计和环境影响评价。环境保护设计主要指:地下水库引起地下水位严重下降、地面大面积沉降时,应当采取防止或减少的措施;地下水库引起植被破坏、影响动植物繁殖和生存时,应当采取的措施;地下水库对名胜古迹、风景游览区、自然保护区等产生影响时,应当采取的保护措施等。地下水库环境影响评价主要指:如何评价建立地下水库所引起的环境问题,评价库区地表环境、地表水回灌对地下水水质的影响等。(6)地下水库经济效益分析和评价。

5 结语

本文初步研究了地下水库的基本概念、分类方法、建库条件、设计方法和设计理论框架,随着地下水库实践的丰富和认识的深化,地下水库设计理论将会得到不断地丰富和完善。

参 考 文 献:

- [1] 林学钰.论地下水库开发利用中的几个问题[J].长春地质学院学报,1984,2:113—121.
- [2] 赵天石.关于地下水库几个问题的探讨[J].水文地质工程地质,2002,5:65—67.
- [3] 杜汉学,常国纯,等.利用地下水库蓄水的初步认识[J].水科学进展,2002,13(5):618—622.
- [4] 郑德凤,王本德.地下水库调蓄能力综合评价方法探讨[J].水利学报,2004,(10):56—62.
- [5] 赵云章,邵景力,焦红军,等.黄河下游影响带地下水库的基本特征[J].水利学报,2003,(4):90—93.

Concept and design theory of groundwater reservoir

LI Wang-lin^{1,2}, SHU Long-chang¹, YIN Zong-ze¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: The concept of groundwater reservoir was introduced and the water-storing medium classification method for groundwater reservoirs was proposed. Based on the analysis on two basic conditions, i. e. water-storing structure and water source, for building groundwater reservoir, three other basic conditions, such as sustainable development condition, environmental condition and ecological condition should be considered. The Wanghe groundwater reservoir was chosen as a case study, the dynamic design method of groundwater reservoir was put forward. The basic design theory of groundwater reservoir should include: theory for building groundwater reservoir, theory of groundwater hydrology, theory of recharge and exploitation of groundwater, design theory of buildings, environment protection design and evaluation of environment impact assessment, economic benefit analysis and evaluation.

Key words: groundwater reservoir; water-storing medium classification method; conditions for building groundwater reservoir; dynamic design method; design theory

(责任编辑:王成丽)

(上接第 612 页)

Effect of drainage control on salt and water balance in rice field

LUO Wan, JIA Zhong-hua, FANG Shu-xing, WANG Liang

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Yinnan Irrigation District, in Ningxia Hui Autonomous Region discharges a large amount of drainage water into the Yellow River each year and influences the water quality of the River. A field experimental study on the effect of drainage control on salt and water balance in rice fields was carried out in summer, 2004. Controlling weirs were installed at the field ditch outlets to raise water level during the growing season. Flow measurement data showed that when the depths of drainage ditches were reduced from 1m to 60cm by the weirs, the subsurface drainage water amount was reduced by 50%, but the salt content in the controlled fields increased merely by 3.7%. It may conclude that the drainage control plays a significant role in water saving and non-point source pollution reduction.

Key words: agriculture drainage; controlled drainage; drainage flow; salinity; Yellow River Irrigation District

(责任编辑:吕斌秀)