

# 北京地下水人工回灌悬浮物堵塞试验研究

李 鹏<sup>1,2</sup>, 邢国章<sup>3</sup>, 张 院<sup>2</sup>, 刘颖超<sup>2</sup>, 刘 凯<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195;

3. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

**摘 要:** 针对北京地下水人工回灌过程中严重影响到回灌效率的入渗场地介质堵塞问题, 采用北京市地下水回灌场地实际地层的土体, 开展室内土柱模拟试验, 以永定河河道内砾砂和西郊西黄村砂石坑的圆砾作为入渗介质, 注水中悬浮物浓度分别为 5、1、0.5 g/L。试验结果表明: 悬浮物堵塞会引起土柱渗透系数大幅衰减; 悬浮物堵塞主要发生在回灌场地表层, 在试验柱内可分为两层, 表层为严重堵塞区, 最深达 12 cm, 下层为堵塞影响区, 深度可达 65 cm; 渗透介质颗粒越粗、悬浮物浓度越大, 严重堵塞和堵塞影响的深度越大, 而渗透介质颗粒越细、悬浮物浓度越大, 土柱越快发生堵塞。

**关键词:** 北京; 人工回灌; 悬浮物堵塞; 渗透系数; 颗粒粒径

**中图分类号:** P641.25 **文献标识码:** A

## Experimental Research of Suspended Solid Clogging of Groundwater Artificial Recharge in Beijing

LI Peng<sup>1,2</sup>, XING Guo-zhang<sup>3</sup>, ZHANG Yuan<sup>2</sup>, LIU Ying-chao<sup>2</sup>, LIU Kai<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;

3. Beijing Institute of Geological and Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The clogging seriously affects the efficiency of groundwater artificial recharge in Beijing. Laboratory column is used to simulate the clogging process by practical sand in Beijing recharge field, in which gravelly sand from Yongding River and gravel from Xihuangcun sand pit are used as the infiltration media. The suspended solid concentration of injecting water is set as 5g/L, 1g/L, 0.5g/L, respectively. The result indicates that suspended solid clogging reduces the permeability coefficient sharply, seriously occurs in the upper 12cm layer and can impact at a depth of 65cm. The clogging impacts deeper when high concentration suspended solid is injected into the coarse particles and occurs faster when high concentration suspended is injected into the fine particles.

**Key words:** Beijing; artificial recharge; suspended solid clogging; permeability coefficient; particle diameter

多年来由于北京市对地下水资源的超量开采产生了地下水资源逐步枯竭、地面沉降、地下水水质恶化等问题<sup>[1]</sup>。随着南水北调工程的开展, 利用超采所带来的地下储水空间进行人工回灌, 对缓解北京市水资源紧张状况, 提高首都供水保证程度具有重要的现实意义。然而以往实践证明, 在地下水人工回灌系统中, 堵塞问题最可能导致工程失败。如北京市 1981 年开始利用深井开展人工回灌, 至 1999 年底实际回灌单位由 64 个缩减至 13 个<sup>[1]</sup>, 停灌主要的技术层面原因就是回灌井阻塞所导致的回灌效率低下乃至报废。而北京地区以往大量的试验

工作主要集中于地层入渗性能方面, 缺乏人工回灌地下水过程中的渗滤技术、堵塞的试验研究。

堵塞是指由物理、生物、化学过程而导致渗透介质孔隙度和渗透性降低的现象, 按其成因的性质, 可分为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞三大类<sup>[2-5]</sup>。物理堵塞指由物理作用所导致的现象, 其中的物理作用又可分悬浮物累积、气体充填和压力变化 3 种。其中悬浮物堵塞是回灌系统中最突出最典型的堵塞现象<sup>[6-9]</sup>。本试验采用室内土柱试验的方法, 模拟单位水力梯度下, 以典型浓度悬浊水向不同介质注入的情况, 分析该入

渗过程中渗透系数的变化以及注水中悬浮物浓度对含水介质渗透性的影响。

## 1 试验材料和方法

野外调查北京市地下水人工回灌场所渗透介质,选取永定

河河道内砾砂以及西郊西黄村砂石坑内圆砾两种介质进行试验,颗粒组成见表 1,砾砂中粗颗粒的含量要明显小于圆砾。悬浊水用潮白河河道内的雨洪冲刷土来配制,5 g/L 代表山洪暴发时雨洪水浓度,1 g/L 为山洪水出山口处浓度,0.5 g/L 为模拟回灌水的平均悬浮物浓度。

表 1 试验介质颗粒组成百分比  
Tab.1 Composition proportion of the media particles

	石	砾	砂粒			粉粒	黏粒
	>20	20~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
永定河内砾砂 LS	—	44.8	20.2	19.3	11.3	4.4	—
砂石坑圆砾 YL	29.2	38.7	8.8	12.9	9.7	0.7	—

砾砂土柱编号为 LS1(1 g/L),LS2(5 g/L),LS3(0.5 g/L),试验开始时用较清洁的地下水(称之为“清水”)灌注了 13 h 左右;圆砾土柱编号为 YL1(1 g/L)、YL2(0.5 g/L)。

试验系统见图 1,土柱由有机玻璃制成,高 120 cm,内径 14 cm。柱体由三部分组成:上下各有 10 cm 的水流缓冲区;中部为渗流区,高 100 cm。柱体侧面共分布有 32 个测压孔,上下缓冲区各一个,渗流区由上至下,1~10 号测压孔间距为 2 cm,10~20 号孔之间间距为 3 cm,20~30 号孔之间间距为 5 cm。通过供水装置注悬浊水入土柱内,记录不同时刻各测压管内水头值及流量。

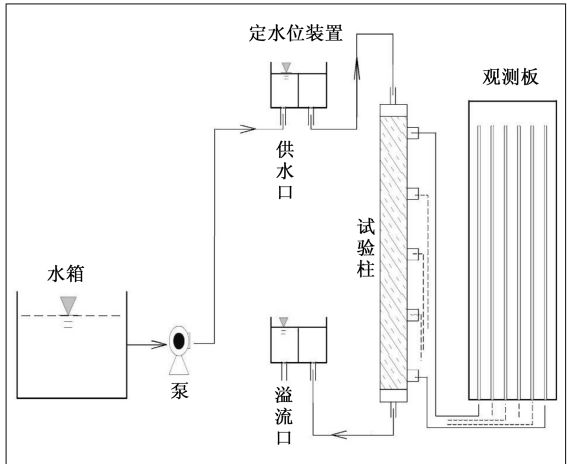


图 1 土柱试验系统示意图

Fig.1 The schematic of the column experimental system

土柱内介质渗透系数依据达西定律进行计算[公式(1)],可获得不同时刻不同深度的渗透系数值。

$$K = \frac{4Q\Delta L}{\pi D^2 \Delta h} \tag{1}$$

式中: $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\Delta L$ 为任意两测压管间距离, $\text{m}$ ; $\Delta h$ 为两测压管中水头差, $\text{m}$ ; $D$ 为土柱内径, $\text{m}$ 。

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 不同深度渗透系数随时间变化规律

根据测压管观测的不同深度将土柱分为若干层位,由试验数据绘制土柱 LS1 各层位渗透系数随时间变化曲线图,如图 2 所示,竖线左侧为注入清水阶段,右侧为注入悬浊水阶段。

从图 2 可以看出,不同层位的介质渗透系数变化有着显著

的区别。

(1)0~6 cm 深度范围渗透系数的变化规律。在此深度范围内,从注入清水开始,随时间的增加,各层渗透系数整体趋势为快速上升后急剧下降,最后降幅变缓趋于稳定。开始有一小段明显的上升过程,0~2 cm 上升阶段约 12.5 h,2~4 cm 上升阶段约 22 h,4~6 cm 深度上升长达 32 h,上升持续时间随深度的增加而增加,上升幅度最大为初始渗透系数的 3 倍;之后渗透系数迅速降低,持续时间 0~2 cm 为 34 h,2~4 cm 为 39 h,4~6 cm 为 58 h,最后渗透系数的变化速度降低, $K$  值低至 0.1 m/d。

(2)6~44 cm 深度范围渗透系数的变化规律。各层介质的渗透系数变化特点为“快速升高后缓慢下降”。由浅到深 7 个不同层位升高阶段持续的时间从 32 h 增加至 67 h,可见其随深度的增加而增长;下降阶段,各层  $K$  值变化速度均很缓慢,但未降至灌悬浊水时的初始值。

(3)44~100 cm 深度范围渗透系数的变化规律。各层位渗透系数均呈现“先持平,再缓慢上升,最后趋于稳定”。由浅到深各层渗透系数上升持续时间从 51 h 增加至 98.5 h,随着深度的增加而增长;最后,渗透系数趋于稳定。

初始  $K$  值之间的差异是由于渗透介质的非均质性及充填土柱时各层的压实程度不同引起的,土的密度小,孔隙度大时,渗透系数也就大。因此,土柱某些深度并不是在试验开始就产生了堵塞。

土柱的装填过程是采用分层压实并由底部往上注入清水,这极有可能发生气相堵塞。这是由于气泡充填于孔隙当中,介质的有效孔隙度减小,从而会降低渗透介质的导水能力。虽然试验中校正测压管时进行了排气,但其影响不会完全消失。渗透系数呈现的不同变化规律与其所处位置也有密切的关系。首先,不同深度处渗透系数在试验开始后均有不同程度的上升,主要受介质中的空气溶解于水所致。位置越深,在饱水过程中空气越不易排出,由此表现出随着深度的增加,渗透系数上升的幅度越来越小,但持续的时间会越来越长;随后渗透系数的变化主要受控于介质中沉积的悬浮物含量的变化,由于悬浮物进入介质中因多种作用导致其在介质孔隙中积累,使孔隙逐渐降低,从而通过的悬浮物量越来越少,渗透系数随深度降低的幅度也越来越小,一定深度以下渗透系数始终未出现下降,可以被认为是悬浮物没有影响到的区域。

可以根据不同层位渗透系数的变化特征,将土柱分为三个

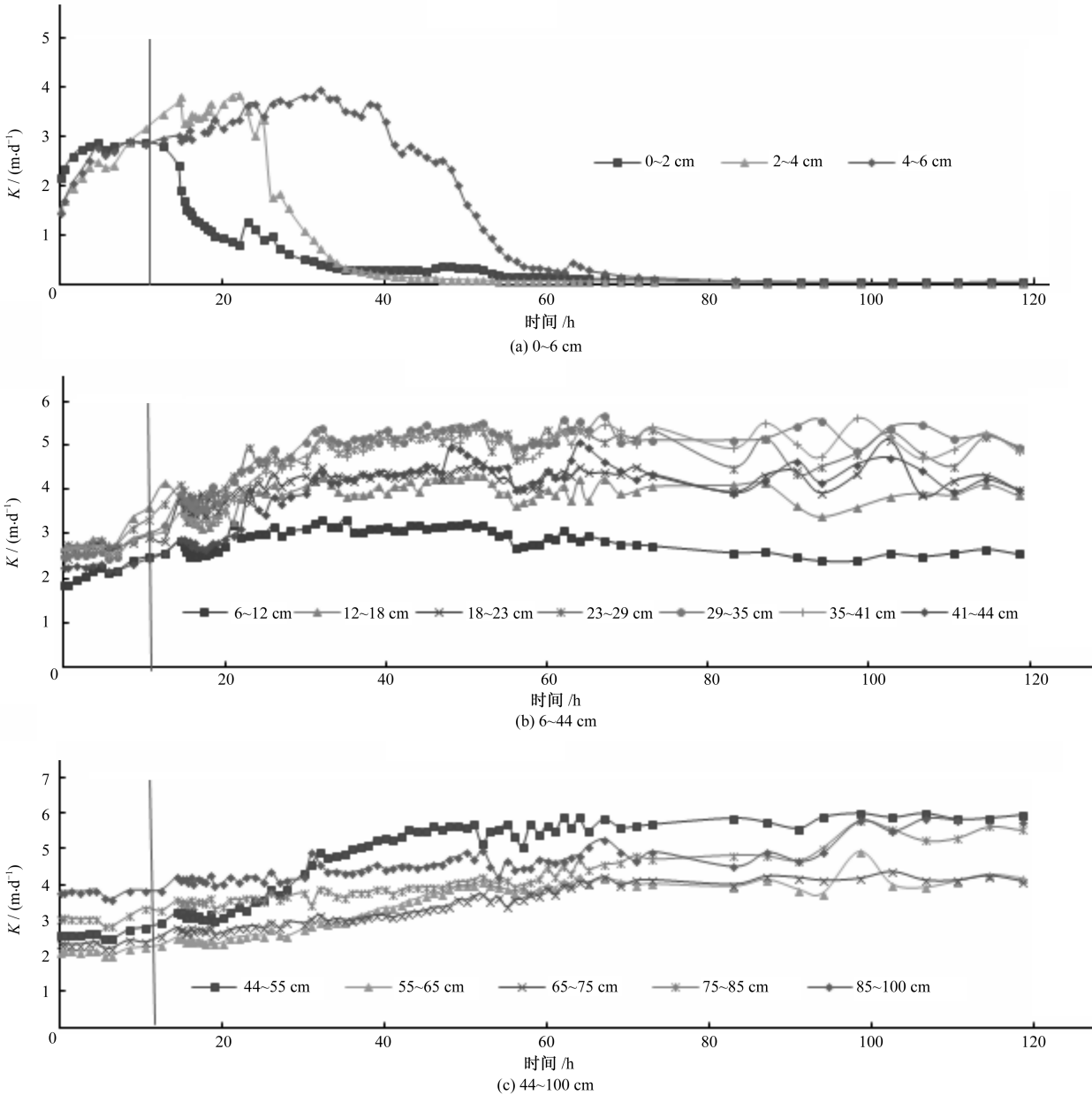


图 2 LS1 不同层位渗透系数(K)随时间变化曲线

Fig.2 Curve of the permeability coefficient changes with time of column LS1s different layers

变化区,第一为严重堵塞区,也就是土柱受悬浮物堵塞影响严重的表层区;第二,堵塞影响区,其分界线即悬浮物堵塞影响的最大深度,由于表层随着孔隙中积聚的悬浮物的增多而使孔隙直径减小,对悬浮物过滤的能力增加,使进入该区水中悬浮物含量下降,从而导致这一深度内堵塞程度大大降低;第三,未发生堵塞区。

其他 4 根土柱 K 值变化规律与 LS1 类似。综合试验结果,可将不同岩性、不同悬浮物浓度的土柱的严重堵塞区和堵塞影响区的分界深度加以对比,列于表 2。

由表 2 可以看出:①土柱 LS1、LS2、LS3 的渗透介质岩性相同,注入 LS2 的悬浊水浓度最大,两种变化区界线最深;土柱 YL1 也深于 YL2,说明悬浮物含量越高,越容易充填于介质孔隙中,堵塞深度越大;②注入相同浓度的悬浊水,圆砾的严重影响区分界比砾砂更深,说明渗透介质的颗粒越粗,孔隙体积越

表 2 各土柱堵塞分区分界线		
Tab.2 The boundary of column clogging zone		
编号	严重堵塞区分界/cm	堵塞影响区分界/cm
LS1(1 g/L)	6	44
LS2(5 g/L)	10	65
LS3(0.5 g/L)	4	26
YL1(1 g/L)	12	47
YL2(0.5 g/L)	8	35

大,悬浮物随水流进入介质的比率增大,而且介质的渗透性强,水流速度大,悬浮物浓度相同的情况下,堵塞深度就越大;③实际回灌过程中悬浮物堵塞主要发生在回灌场地较浅的表层。

2.2 土柱整体渗透系数随时间变化规律

根据试验数据绘制各土柱整体渗透系数随时间变化情况,如图 3 所示。

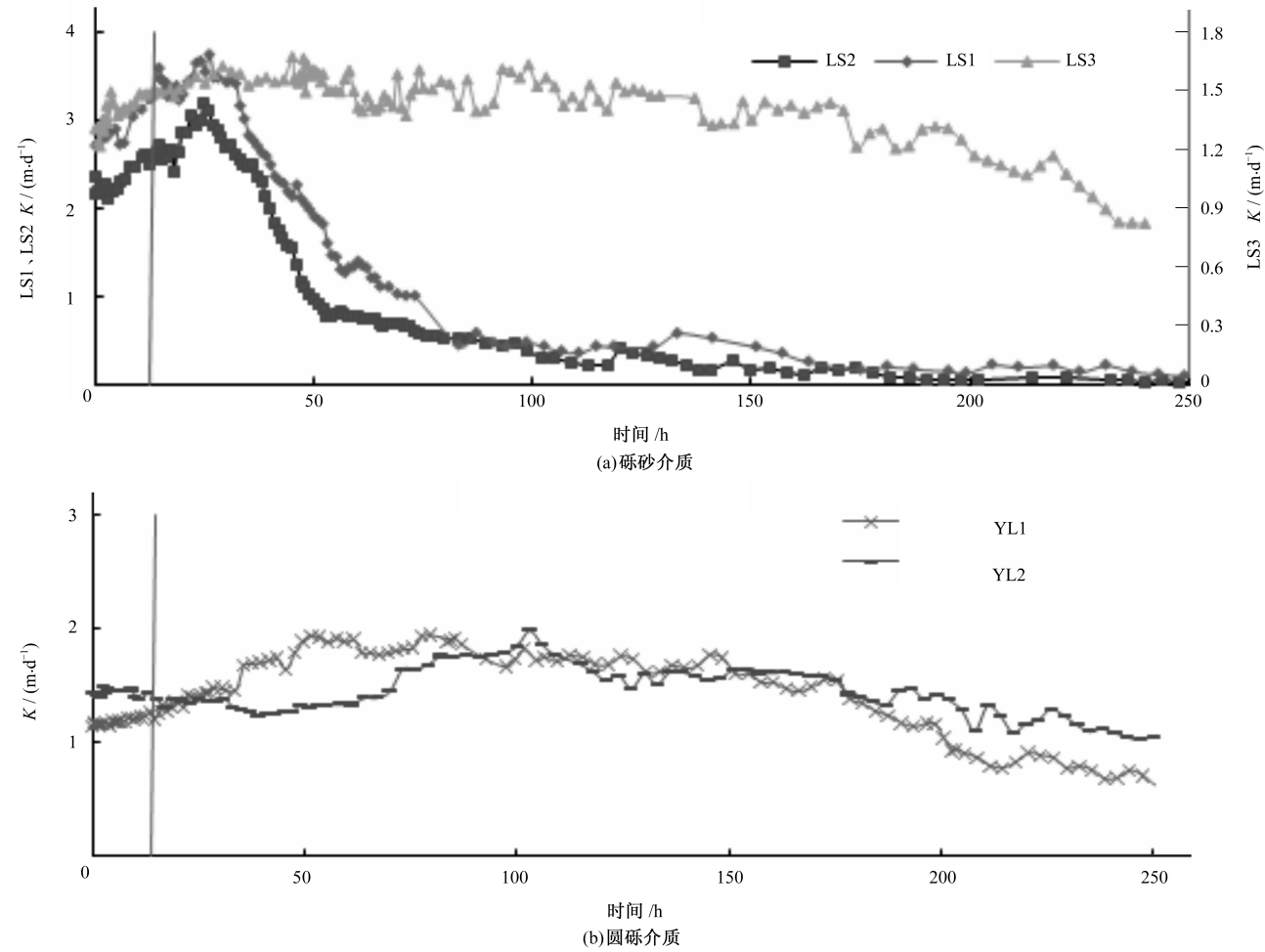


图 3 各土柱整体渗透系数随时间的变化

Fig.3 Overall permeability coefficient of the column changes with time

由图 3 可以看出,渗透介质从注入清水开始,土柱整体渗透系数的变化大体可分为以下两个阶段:①快速上升阶段:注清水阶段能够促使渗透介质空隙中的一部分空气溶解于水,使水流通道变宽<sup>[10]</sup>,因而增大介质的渗透系数。随着试验的进行,一方面空隙中的空气继续溶解于水,孔隙增大,另一方面悬浮物在介质中淤积逐渐增多,悬浮物充填孔隙体积所起的作用越来越大,在二者的共同作用下,介质的渗透系数达到一个最高值点后伴随着悬浮物在介质孔隙中积聚量的不断增多而略有下降。②快速下降阶段:当介质中的空气逐渐溶解于水中后,悬浮物堵塞作用占据主导地位,从而使渗透系数呈现出快速下降的趋势,最终降至一个最低值。

将 5 根土柱整体渗透系数变化特征值列于表 3。  
由表 3 可知,渗透介质颗粒越细,悬浊水浓度越高,土柱越快发生堵塞。渗透系数  $K$  是土柱入渗性能的直接体现, $K$  值大幅衰减表明悬浮物会对入渗介质产生严重的破坏效应。悬浮物淤积堵塞对于土柱渗透系数的影响程度是非常大的,最严重者可使回灌功能几乎失灵。

3 结 语

(1)渗透介质表层为悬浮物严重堵塞区,深度可达 12 cm,而堵塞影响到的深度最大 65 cm,可以确定实际回灌过程中悬

表 3 各土柱整体渗透系数变化特征

Tab.3 The characteristic of the column overall permeability coefficient changing

编 号	上升到最高值时间/h	试验结束 $K$ 损失率/%
LS1(1 g/L)	26	98.39
LS2(5 g/L)	25	98.43
LS3(0.5 g/L)	47.5	37.80
YL1(1 g/L)	52	53.30
YL2(0.5 g/L)	103	26.79

浮物堵塞主要发生在回灌场地表层的数十厘米内。  
(2)砾砂和粒径更粗的圆砾介质以及悬浮物含量不同的悬浊水试验对比表明,介质颗粒越粗、悬浮物浓度越大,严重堵塞和堵塞影响的深度越大;而渗透介质颗粒越细,悬浮物浓度越大,土柱越快发生堵塞。  
(3)悬浮物堵塞会引起土柱渗透系数大幅衰减,整体渗透系数衰减率为 26.79%~98.43%。  
针对悬浮物堵塞试验研究成果,可引出一些促渗和治理措施。如控制回灌水源特征,对于砂石坑和大口井,可在回灌场地前再设置一个沉淀池,提前截留水中的悬浮物,以起到改善回灌水质的目的;在场地选择时可选择颗粒级配较粗的回灌地点;由于悬浮物堵塞集中在表层的数十厘米内,对入渗场所底部进行耕犁在短期内恢复渗透性具有明显效果。 (下转第 70 页)

价,并作为水源地允许开采量计算的约束条件进行控制,提高水源地允许开采量评价精度。

水源地采用水均衡法、解析法和三维数值法评价地下水允许开采量,3种方法验算对比结果见表1,这些差别主要是由于模型的使用条件、参数的表达形式不同及对边界处理方法不一致造成的。说明本次计算的水源地地下水允许开采量的补给量是有保证的。

表1 研究区开采条件下各种计算成果对比表						
计算 方法	布井 方式	补给 资源/ (万 m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> )	消耗量/ (万 m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> )	允许 开采量/ (万 m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> )	预测水 源地稳 定时间/ a	预测漏 斗中心 水位埋 深/m
均衡法		22 509.00	22 339.16	12775		
解析法	双排			12 848		11.35
数值法	双排	21 359.87	20 525.28	12 848	20	14.78

## 5 地下水水质评价

根据本次地下水取样分析结果,将全区浅层地下水划分为HCO<sub>3</sub>—Ca·Mg、HCO<sub>3</sub>—Ca·Mg·Na、HCO<sub>3</sub>—Mg·Ca(·Na)、HCO<sub>3</sub>—Mg·Na·Ca和HCO<sub>3</sub>—Na·Ca(·Mg)等水化学类型。对照生活饮用水卫生标准,对区内浅层地下水饮用水评价如下:区内地下水为无色、无味、无嗅、无肉眼可见物,水温16.3℃左右。矿化度585.13~843.71 mg/L,平均矿化度为606.04 mg/L,pH值7.45~7.90,平均7.37;总硬度388.0~565.5 mg/L(以CaCO<sub>3</sub>计),多属低矿化度弱碱性淡水。区内水文地质钻孔采取所检饮用水水样除Fe<sup>3+</sup>外,其余各项指标均符合生活饮用水标准,民井采取饮用水分析样品Fe<sup>3+</sup>、Mn<sup>2+</sup>超标,Fe<sup>3+</sup>最大含量为2.18 mg/L,超标6.26倍;Mn<sup>2+</sup>最大含量为0.52 mg/L,超标4.2倍;个别样品总硬度稍微超标。总之水源地内浅层地下水水质较好,经适当处理后适宜饮用。

## 6 水源地保护

充分考虑水源地的地质地貌、水文地质条件、地表水体现状、工农业开采等情况,分级建立整个水源地的卫生防护区<sup>[8]</sup>。随着水源地的开采,浅层地下水位的全面开采,会引起一系列

环境地质条件的改变,因此,要建立完整的地质环境保护系统,开展环境地质监测工作,为更好地科学开发地下水水资源提供依据。①建立地下水动态监测和管理系统,对水源地及周边浅层地下水的水质、水量、水位进行长期观测和研究,提供水源地水质发展趋势,研究水源地浅层开采对周边地下水水位、水量的影响以及周边浅层地下水的开采,提出缩小相互影响,并达到长期科学开采浅层地下水的方案。②建立环境质量监测系统,对水源地及周边环境的污染情况进行监测和预报,提出防治和解决污染问题的方法及措施。

## 7 结 语

为了对新乡傍河水源地地下水资源状况进行评价,采用水均衡法、解析法和三维数值法进行了地下水资源量计算和设计新增允许开采量评价,计算结果为,水源地现状条件下地下水多年总补给量为11 503.97万m<sup>3</sup>/a,开采条件下多年平均年总补给量为22 509.00万m<sup>3</sup>/a,水源地设计新增开采量35.0万m<sup>3</sup>/d在开采条件下,采用双排布井方案,通过解析法和数值法计算得出水源地开采主井最大水位降深均不超过含水层厚度的1/3,说明每天以设计开采量开采浅层地下水是可靠的。据地下水水质分析成果,水源地浅层地下水属低矿化弱碱性淡水,地下水水质较好,经适当处理后适宜饮用。

### 参考文献:

- [1] 赵云章,邵景力,崔亚莉.等.黄河悬河段影响带远景水源地可采资源评价[J].人民黄河,2003,25(5):22—24.

[2] 赵云章,邵景力.黄河下游影响带地下水资源评价及可持续开发利用[M].北京:中国大地出版社,2002.

[3] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.

[4] 杜玉娇,何新林,杨广,等.水均衡法评价玛纳斯河流域莫索湾灌区地下水资源[J].中国农村水利水电,2012,(9):63—65.

[5] 赵琳琳,肖长来,陈昌亮.杨家杖子经济开发区地下水资源评价[J].节水灌溉,2013,(9):8—10.

[6] 吴文强,李文文,刘君利.水均衡与数值模拟法在地下水资源评价中对比应用[J].中国农村水利水电,2009,(6):45—48.

[7] 孙爱华,朱士江.Visual MODFLOW 在八五三农场地下水数值模拟中的应用[J].中国农村水利水电,2009,(3):24—27.

[8] HJ/T338-2007.饮用水水源保护区划分技术规范[S].
- [6] Iwasaki T. Some notes on sand filtration[J].Journal of American Water Works Association,1937,29(10):1 591—1 602.

[7] Stein P C. A Study of the theory of rapid sand filtration of water through sand[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, USA, 1940.

[8] Rinck-Pfiffer S,Ragusa S,Sztajnbok P,et al. Interrelationships between biological,chemical and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells [J].Water Research,2000,34(7):2 110—2 118.

[9] Siriwardene N R,Deletic A,Fletcher T D.Clogging of stormwater gravel Infiltration systems and filters: insights laboratory study [J].Water Research,2007,41:1 433—1 440.

[10] 叶守杰.渗滤取水现场试验的渗流场特征及数值模拟研究[D].成都:西南交通大学,2002.

(上接第66页)

### 参考文献:

- [1] 孙颖,苗礼文.北京市深井人工回灌现状调查与前景分析[J].水文地质工程地质,2001,(1):21—23.

[2] 上海市水文地质大队.地下水人工回灌[M].北京:地质出版社,1977:168—176.

[3] Olsthoorn T N. The Clogging of Recharge Wells, Main Subjects [C]// KIWA-Communications 72.Working Group on Recharge Wells. 1982:136.

[4] Custodio E, Isamat J, Miralles J.Twenty-five Years of Groundwater Recharge in Barcelona (Spain)[C]//DVWK Bulletin 11. Artificial Groundwater Recharge. USA, 1982:171—192.

[5] Brown R F, Signor D C. Artificial recharge state of the art [J]. Groundwater,1974,12:152—160.