

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0118

宋浩楠, 陈文婧, 田晓华, 等. 华北中部平原地表水入渗试验: 以南宫滦泸河为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1157-1166. SONG H N, CHEN W J, TIAN X H, et al. Surface water infiltration test in the central plain of north China: A case study of Suolu River, Nangong[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1157-1166. (in Chinese)

华北中部平原地表水入渗试验

——以南宫滦泸河为例

宋浩楠, 陈文婧, 田晓华, 田战辉, 杨志光, 尤冰

(河北省水文工程地质勘察院, 石家庄 050021)

摘要:华北平原中部地区含水砂层颗粒细且薄,对地下水储蓄和地表水入渗不利。选择河道带进行地表水入渗试验,以获取最大地下储蓄空间,为该区水资源合理利用提供良策。试验区选在南宫滦泸河,人工引水1.5个月,获取大量监测数据,据此对地下水位和水量的变化特征、入渗量和地下水库调蓄能力进行研究,结果表明:干涸河道引水入渗,入渗比例可达80.54%;滦泸河上下游2个断面I-I'和II-II'河道垂向渗透速度为10.81 m/d和10.72 m/d;水平扩散速度为1.69 m/h和2.38 m/h。由于I-I'断面垂向渗透速度大于II-II'断面,而水平扩散速度小于II-II'断面,所以I-I'断面形成的水丘相比II-II'断面较为明显,且不易消散。计算结果显示,试验区调蓄库容为1.87亿m³。

关键词:滦泸河;入渗试验;入渗量;地下水库;调蓄能力

中图分类号:TV62 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



为缓解区域性水资源短缺和水资源时空分布不均的局面,我国修建了大量的地表水库和地下水库。与地表水库相比,地下水库具有占地少、不易被污染等优点,因此,越来越多的国家和地区选择利用地下水库调蓄区域水资源^[1-3]。通过地下水库进行调蓄时,入渗过程中地下水位的变化情况将直接影响区域水资源的调蓄规划。因此,通过地表水入渗试验研究入渗过程中地下水位动态变化具有重要意义。

近年来,诸多学者对地表水入渗试验进行了研究。1981年开始的“北京西郊地区人工调蓄地下水资源试验研究”项目是国内最早的人工补给入渗试验研究项目,其人工入渗试验点包括河道、砂石坑、平原水库和回灌井。通过控制入渗场包气带岩性、

回灌水悬浮物含量等因素,对人工补给的入渗速率进行模拟研究^[4];在黄水河地下水库人工入渗补给中,为增加入渗速率,将多种技术与人工入渗相结合,其中包括梯级拦河闸、反滤回灌井、人工补给回灌井和人工入渗沟^[1];在对地表水入渗试验的研究中,贺屹^[5]提出了“S-P-D”补给系统,即让回灌水源先补给浅层地下水,经土壤过滤净化后再补给深层地下水。该系统具有补给速度快、补给水量多、不容易堵塞等优点;张增勤等^[6]、冯创业等^[7]开展了滹沱河河道入渗试验,通过容积法和垂直河道观测法对滹沱河地下水库的调蓄能力和地下水位动态变化进行了研究。大量研究成果为本次地下水库入渗试验研究提供了参考,但在古河道带上的地下水库大型入渗试验仍比较少,对古河道

收稿日期:2020-08-27 修回日期:2020-10-30 网络出版时间:2020-11-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20201123.1131.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401404)

作者简介:宋浩楠(1993—),男,河北沙河人,主要从事水文地质勘察研究。E-mail:15227805031@163.com

通信作者:陈文婧(1980—),女,黑龙江讷河人,高级工程师,主要从事区域水文地质环境地质调查研究。E-mail:40174144@qq.com

带地表水入渗方式和入渗过程中地下水位动态变化的研究稍显不足。

华北平原地处我国缺水最严重的海河流域,为改善目前地下水环境,应充分发挥地下水库的调蓄功能,利用多年形成的地下水漏斗,实施人工和天然调蓄。以滦泸河大型河道入渗试验为契机,通过容积法和地表水入渗试验对地下水库调蓄能力和地下水位变化特征进行研究,为华北平原古河道地区区域水资源的调蓄规划提供依据。

1 研究区概况

南宫地下水库位于南宫市的东南部,地处黑龙港地区,在清凉江以北的古黄河、大清河、漳河故道上。区域内含水层主要是地表至地下 30 m 左右的砂层,呈北东-南西向的条带状分布。垂向上大致由 2 层组成,岩性以细砂、粉砂为主,局部含中砂。自地面以下至 10 m,主要岩性为粉砂。该层砂体厚度较小,砂体厚度由中间的 1~4 m 向两侧变薄尖灭,砂体宽度变窄;自地面下 10~34 m,主要岩性为中细沙、细沙、粉细砂、粉砂。砂体结构厚度由中间的 12~20 m 向两侧变薄尖灭,砂体宽度为 8.5~12.8 km^[8]。

2 入渗试验简介

2017 年 12 月 20 日—2018 年 2 月 12 日,南宫市水务局组织开展了南宫古河道区入渗试验。试验场为南宫市东南部滦泸河、乔村渠和试验站渠,试验水源为岳城水库水,持续放水 58 d,累计试验水量 570.91 万 m³。通过在南宫古河道带上开展入渗试验,研究地表水入渗量和地下水位变化特征,为引黄水调蓄规划的制定提供依据。

以滦泸河入渗场为例进行研究,在滦泸河入渗场上选取 2 条横向监测断面,见图 1,通过观测监测孔中水位变化情况分析地表水入渗方式。试验过程中,河渠监测断面 II-II' 的过水时间为 2017 年 12 月 30 日 21:00,其中间监测孔 M₁₆ 于 2018 年 1 月 1 日 20:00 水位发生变化,而距该监测孔 20 m 的 M₁₇ 监测孔 2018 年 1 月 2 日 8:00 水位发生变化,2 个监测孔成孔深度一样,均为 35 m。因此,在地表水入渗过程中,入渗初期为垂直河床底面的自由渗透,遇到黏土层或地下水水面后形成水丘,随着地表水持续入渗,水丘将同时向垂向和水平方向上扩展,见图 2。

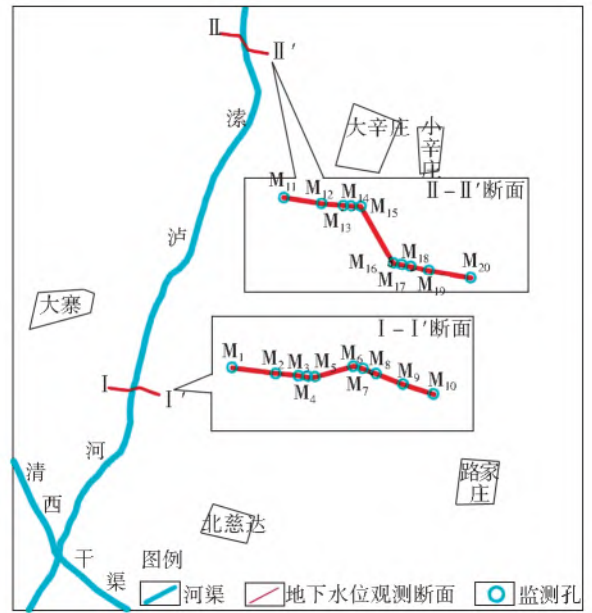


图 1 入渗场水位动态监测断面

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic monitoring section of water level in infiltration field

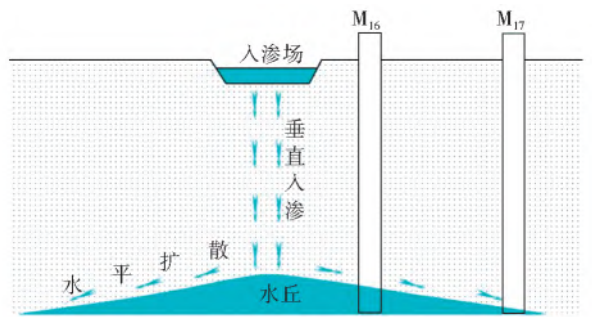


图 2 入渗方式

Fig. 2 Infiltration mode

3 入渗量计算

3.1 计算方法

根据入渗试验过程中获得的降水量、蒸发量、滞留量等观测数据,采用水量平衡的原理求取滦泸河入渗试验期间河道入渗水量^[9-13]。

研究区水量平衡方程式为

$$Q_{\text{收入}} = Q_{\text{支出}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{收入}} = Q_{\text{降}} + Q_{\text{试验}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{支出}} = Q_{\text{蒸}} + Q_{\text{入渗}} + Q_{\text{滞留}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{入渗}} = Q_{\text{降}} + Q_{\text{试验}} - Q_{\text{滞留}} - Q_{\text{蒸}} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{试验}}$ 为试验水量, m³; $Q_{\text{降}}$ 为累计降水量, m³; $Q_{\text{蒸}}$ 为累计水面蒸发量, m³; $Q_{\text{滞留}}$ 为地表滞留水量, m³; $Q_{\text{入渗}}$ 为入渗水量, m³。

3.2 计算条件

根据试验期间逐日观测数据,计算累计降水量和累计水面蒸发量,累计降水量为 0.07 万 m³,累计水面蒸发量为 3.54 万 m³,见图 3。

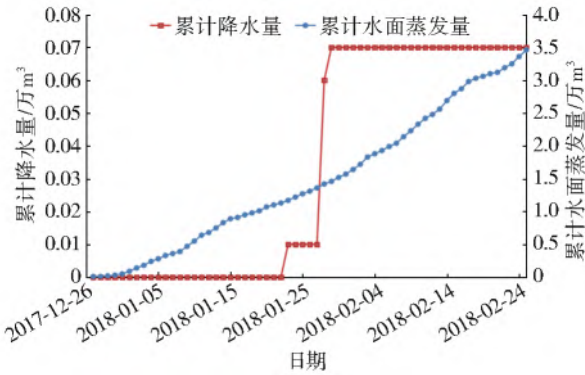


图3 累计降水量和累计水面蒸发量

Fig. 3 Accumulated precipitation and surface evaporation

滦泸河入渗场布置 9 条水深监测断面,根据水深监测断面位置将入渗场划分为 9 个计算区段,见图 4,分别计算各区段的平均蓄水深度。根据滞留水量公式计算地表滞留水量,结果见图 5。

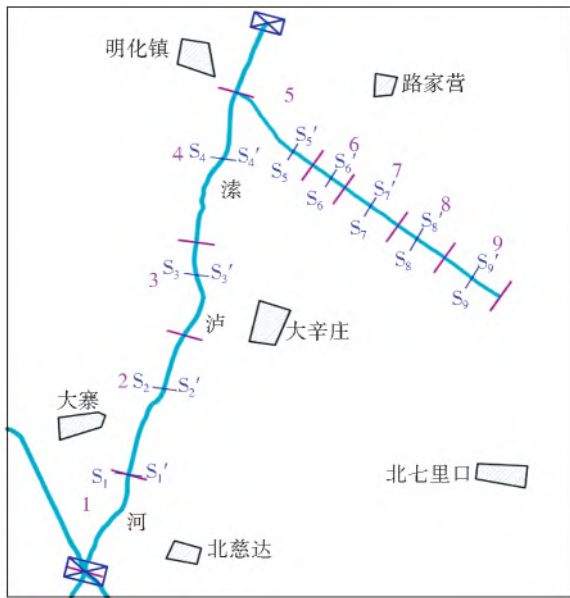


图4 滞留水量计算区段划分

Fig. 4 Calculation section division of water retention

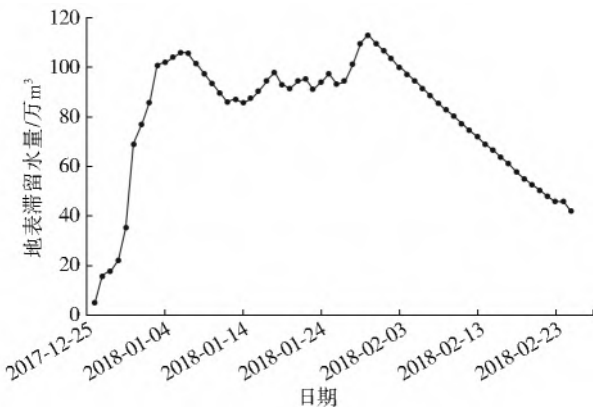


图5 地表滞留水量计算成果

Fig. 5 Calculation results of surface water retention

滞留水量计算公式为

$$Q_{\text{滞留}} = Sh \quad (5)$$

式中: S 为地表滞留水面面积, m^2 ; h 为平均蓄水深度, m 。

2017 年 12 月 25 日 17:30 开始放水,起始流量 $2.29 \text{ m}^3/\text{s}$;2018 年 1 月 30 日 21:30 关闭闸门,持续放水 36 d,累计试验水量 235.00 万 m^3 ,见图 6。

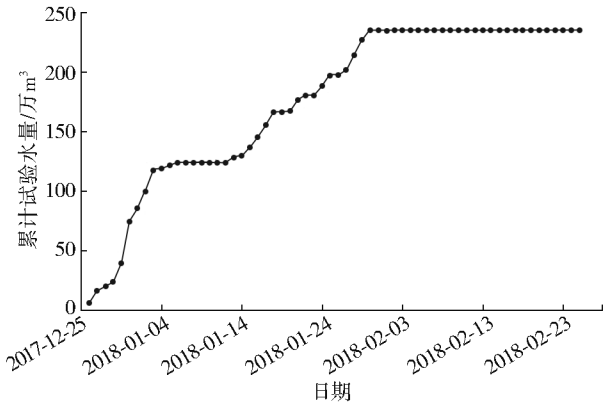


图6 累计试验水量

Fig. 6 Accumulated test water volume

3.3 计算结果

根据水量平衡原理求得累计入渗量为 189.28 万 m^3 ,入渗比例为 80.54% 。通过每日累计入渗量的差值求取日入渗水量,结果见图 7。

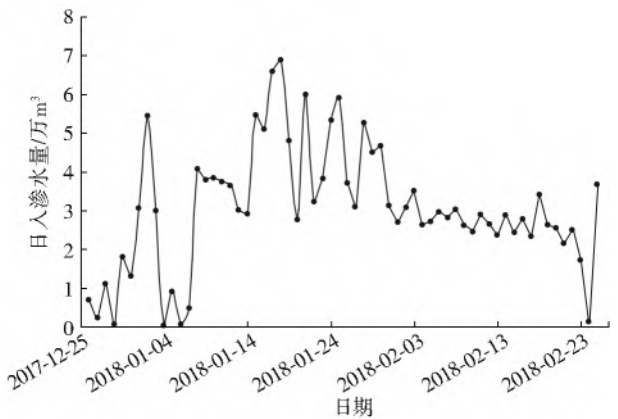


图7 日入渗水量

Fig. 7 Daily infiltration

4 地下水位动态研究

4.1 水位变化影响因素分析

水丘变化的影响因素主要有地层岩性、入渗水垂向渗透速度和入渗水水平扩散速度^[14-20]。

4.1.1 地层岩性

该区域地层自下而上主要有 5 层,见图 8 和图 9:第 1 层(29 m 以下)主要为棕红色粉质黏土层,呈不连续的条带状分布;第 2 层(18~29 m)主要为浅黄褐色细砂,为河道相沉积;第 3 层(13~18 m)主要为棕红色粉质黏土层;第 4 层(6~13 m)主要为灰

黄色粉砂,有水平和交错层理;第 5 层(0~6 m)主要为褐色粉质黏土层。I-I' 剖面上地下水位存在于

第 3 层的底部;II-II' 剖面上地下水位存在于第 3 层的中上部。

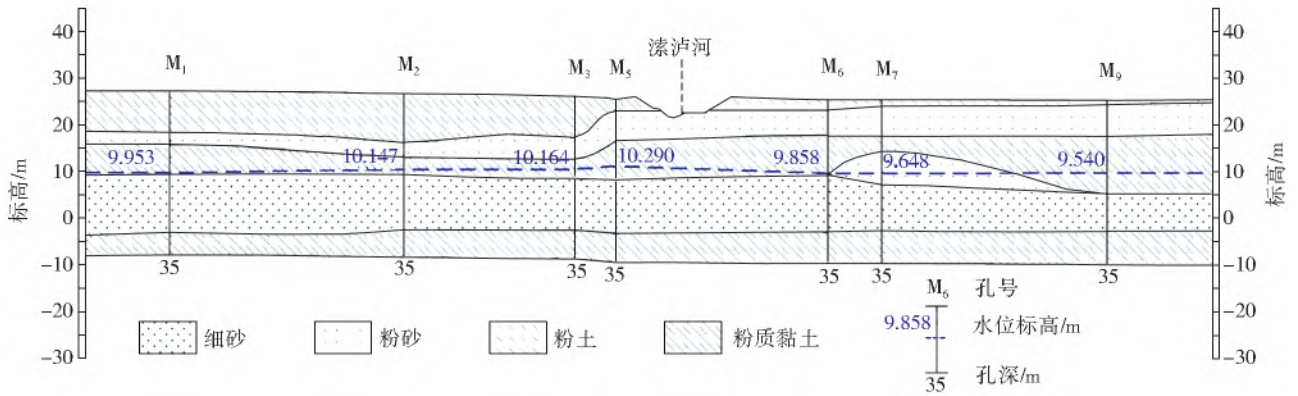


图 8 漆泸河 I-I' 断面剖面
Fig. 8 Profile of I-I' section of Suolu River

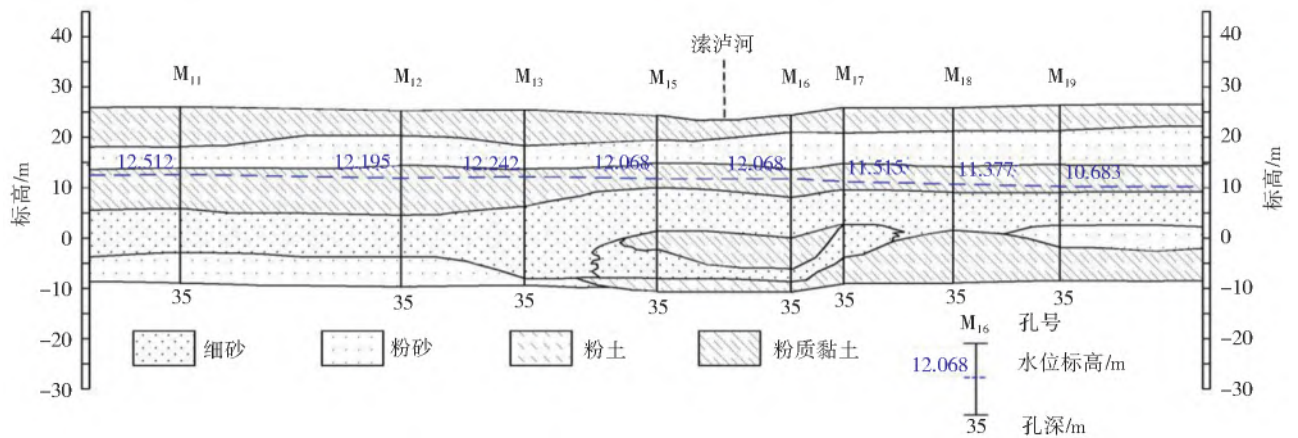


图 9 漆泸河 II-II' 断面剖面
Fig. 9 Profile of II-II' section of Suolu River

4.1.2 入渗水垂向渗透速度

为获得垂向渗透速度,本次试验在 2 个断面距离河道最近处分别布设了地下水位监测孔 M₅、M₆ 和 M₁₅、M₁₆,对地下水位进行实时监测。垂向渗透速度采用公式为

$$V_{\text{垂}} = D / (t_2 - t_1) \quad (6)$$

式中: $V_{\text{垂}}$ 为垂向渗透速度,m/d; D 为地下水位埋深,m; t_1 为观测孔处地表开始过水时间,d; t_2 为观测孔地下水位开始响应时间,d。

通过式(6)分别计算 2 个断面处垂向渗透速度,计算结果见表 1。

表 1 垂向渗透速度计算
Tab. 1 Calculation table of vertical seepage velocity

监测断面	监测孔	过水时间	响应时间	地下水位埋深/m	垂向渗透速度/(m·d ⁻¹)
I-I'	M ₅	2017 年 12 月 27 日 6:00	2017 年 12 月 28 日 8:00	15.33	10.81
	M ₆	2017 年 12 月 27 日 6:00	2017 年 12 月 29 日 8:00	15.57	
II-II'	M ₁₅	2017 年 12 月 30 日 21:00	2017 年 12 月 31 日 20:00	12.35	10.72
	M ₁₆	2017 年 12 月 30 日 21:00	2018 年 1 月 1 日 8:00	12.48	

结合包气带岩性进行分析,由于 2 个观测孔处包气带粉砂和粉质黏土的比例基本一致,所以其垂向入渗速度大小相近。

4.1.3 入渗水水平扩散速度

在 I-I' 断面和 II-II' 断面沿水流方向分别选取观测孔,利用距离差与水位响应时间差计算入渗水水平扩散速度,计算公式为

$$V = \Delta L / \Delta T \quad (7)$$

式中: V 为水平扩散速度,m/h; ΔL 为距离差,m; ΔT 为水位响应时间差,h。

I-I' 断面选取监测孔 M₁、M₂、M₃、M₄、M₅, II-II' 断面选取监测孔 M₁₁、M₁₂、M₁₃、M₁₄、M₁₅,水平扩散速度计算见表 2 和表 3。

表2 扩散速度计算(I-I'断面)

Tab. 2 Calculation of diffusion velocity (I-I' section)

编号	水位响应时间差/h	距离差/m	传播速度/(m·h ⁻¹)
M ₅			
M ₄	72	18	0.25
M ₃	24	21	0.88
M ₂	36	51	1.42
M ₁	24	101	4.21
平均			1.69

表3 扩散速度计算(II-II'断面)

Tab. 3 Calculation of diffusion velocity (II-II' section)

编号	水位响应时间差/h	距离差/m	传播速度/(m·h ⁻¹)
M ₁₅			
M ₁₄	48	22	0.46
M ₁₃	16	18	1.13
M ₁₂	30	50	1.67
M ₁₁	14	88	6.29
平均			2.38

由表2和表3可知:I-I'断面的水平扩散速度为1.69 m/h;II-II'断面的水平扩散速度为2.38 m/h。结合水位变动带的岩性进行分析I-I'断面和II-II'断面水位变动带处都存在粉砂和粉质黏土,

其中:I-I'断面粉砂厚度较小,入渗水水平扩散在粉砂中运动时间较短;II-II'断面粉砂厚度较大,入渗水水平扩散在粉砂中运动时间较长,所以II-II'断面水平扩散速度大于I-I'断面。

4.2 地下水丘研究

4.2.1 地下水丘形成与消亡过程

不同断面,初见水位发生时间和水层厚度虽有早晚和大小之别,但其动态规律基本一致,都经历了地下水丘形成与消亡的过程^[21-28]。

水丘形成过程。从初见水位开始到地表水渗完,随着累计入渗量增加,地下水位明显上升。到2018年2月25日滦泸河试验场水位上升达到最大值6.94 m。

水丘消散过程。地表水渗完,补给停止,水位开始下降,趋向天然状态下的水平衡。

4.2.2 水丘剖面变化过程

为了更加形象地展现地下水丘的演化过程,本次试验从滦泸河试验场选取2条横向断面,见图1,结合水文地质剖面图、垂直渗透速度和水平扩散速度,对试验期间滦泸河地下水位变化特征(图10、11)进行分析。

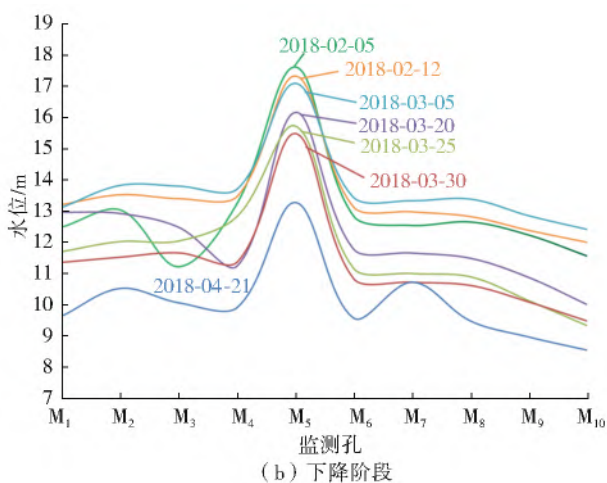
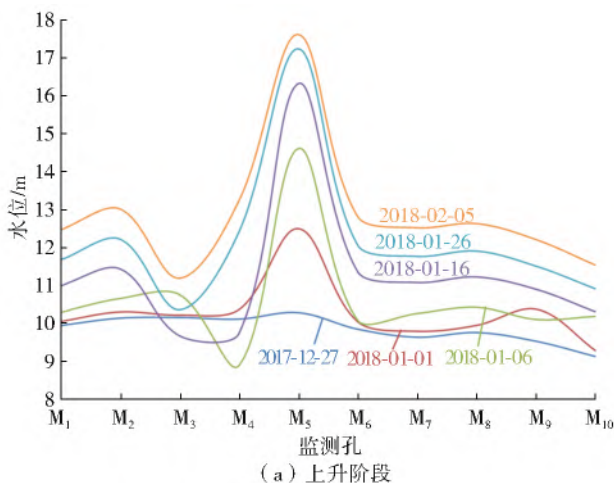


图10 I-I'断面地下水位变化

Fig. 10 Change of groundwater level in I-I' section

从图10和图11中可以看出,在2条断面下方都形成了较为明显的水丘,并以河道为中心线向两侧推进,说明入渗场周边水文地质条件较为相似,渗透能力没有明显差异。2条水丘断面都经历了上升、下降的过程,由于断面位置和包气带岩性存在差异,因此,水丘变化的时间和幅度有所差别。

对比分析2条断面可以看出:由于I-I'断面中心最早接受补给,地下水位最早开始响应,2018年1月1日形成较为明显的水丘,于2018年2月5

日达到峰值;II-II'断面接受补给较晚,响应时间较I-I'断面晚,2018年1月5日形成较明显的水丘,于2018年1月30日达到峰值;当I-I'断面达到峰值时,水丘中心水位上升7.3 m,水丘高差较大;当II-II'断面达到峰值时,水丘中心水位上升3.16 m,水丘高差较小;I-I'断面中,距离入渗场最近的监测孔水位上升速率由大变小,而远离入渗场的监测孔水位上升速率呈现出由小变大再变小的规律;II-II'断面中各个监测孔的水位上升速率基本一致,大小保持稳定。

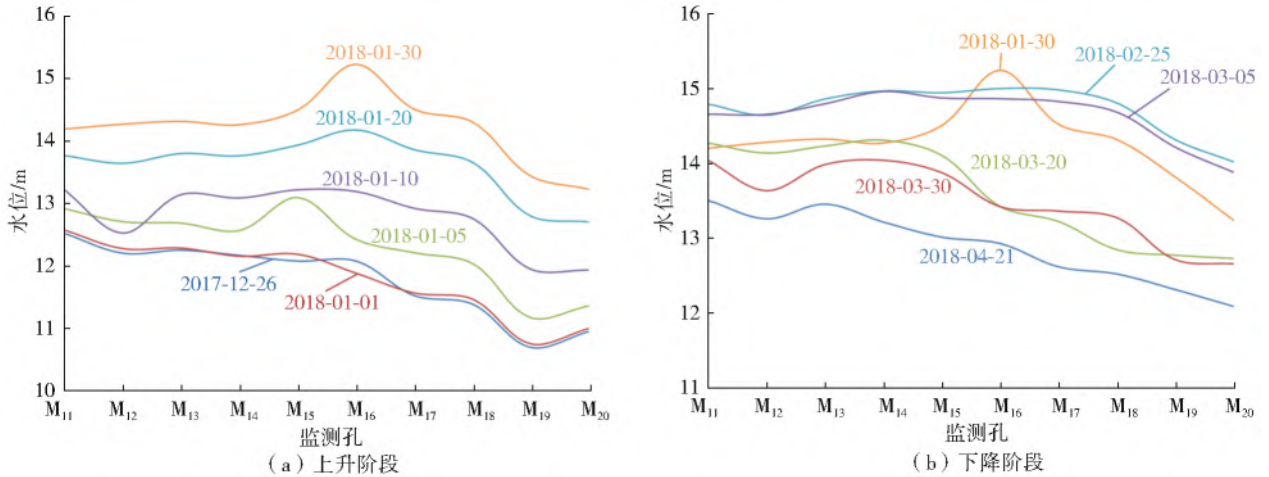


图 11 II-II'断面地下水位变化
Fig. 11 Change of groundwater level in II-II' section

5 单孔水位分析

5.1 研究方法

选取 I-I'断面上靠近入渗场的监测孔 M_5 及远离入渗场的监测孔 M_1 , 通过研究监测孔 M_1 、 M_5 水位与日入渗量、监测孔 M_1 、 M_5 之间水力坡度随时间的变化规律, 分析日入渗量及水力坡度对不同位置监测孔中水位变化的影响。

5.2 结果分析

5.2.1 日入渗量对水位的影响

从靠近入渗场监测孔 M_5 和远离入渗场监测孔 M_1 的地下水位与日入渗量的动态关系可以看出: 总体上随着水量的持续入渗 2 个监测孔中的水位呈现出持续上升的趋势, 水位变化较稳定; 从各监测孔的地下水位动态来看, 监测孔 M_5 中水位对入渗水的响应较快, 入渗初期水位上升速率较快, 入渗中期, 入渗水量在 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 附近波动, 该时期监测孔中水位稳定上升, 入渗后期, 随着日入渗量的逐渐减少, 监测孔中水位缓慢下降; 监测孔 M_1 中水位对入渗水的响应较为滞后, 随着入渗试验的进行监测孔中水位持续上升, 入渗后期出现小幅下降, 日入渗水量对其影响较小, 见图 12。

5.2.2 水力坡度对水位的影响

从监测孔 M_5 和监测孔 M_1 的地下水位与水力坡度的动态关系可以看出: 入渗初期, 监测孔 M_5 中水位变化与水力坡度基本一致, 随着 M_5 中水位的上升, 水力坡度逐渐增大, 监测孔 M_1 中水位变化不明显, M_1 中入渗水主要为水平扩散, 存在滞后; 入渗中期, 随着水力坡度的增大, 入渗水侧向流出量增加, M_5 中水位上升速率减小, M_1 中水位稳定上升, 上升速率逐渐增大; 入渗后期, 随着监测孔 M_1 、 M_5

中水位差的变小, 水力坡度逐渐变小, 在 2018 年 2 月 18 日突然增加, 这是由于 M_1 孔中水位由粉质黏土层上升至粉砂层, 水体向四周扩散变快, 水位下降, 导致水力坡度增大, 见图 13。

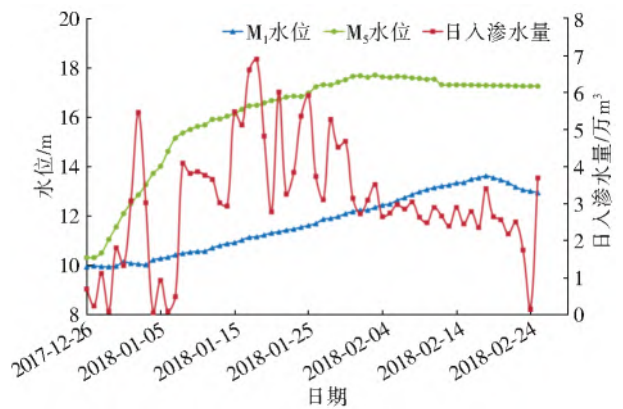


图 12 监测孔地下水动态与日入渗量
Fig. 12 Monitoring groundwater dynamic and daily infiltration

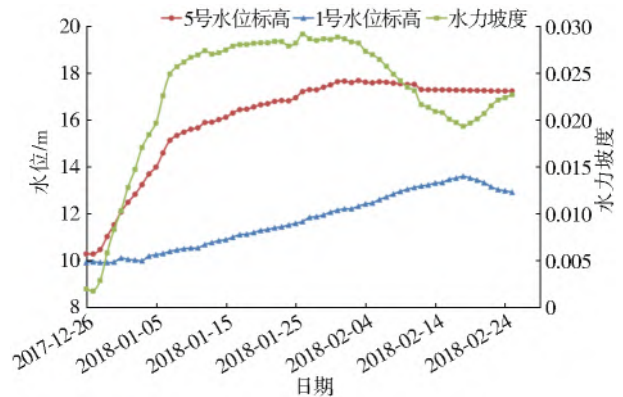


图 13 监测孔地下水动态与水力坡度
Fig. 13 Groundwater dynamic and hydraulic gradient of monitoring hole

6 地下水库调蓄能力计算

6.1 调蓄范围的确定

南宫地下水库主要由古河道沉积的砂层结合区

域性地下水降落漏斗构成调蓄空间。根据古河道沉积位置分布及区域性降落漏斗的位置,确定南宫地下水水库储水空间的范围。

(1) 侧向边界。地下水水库东西边界为河间相地带,该带地层岩性主要为粉质黏土和粉土,透水性极微,是良好的隔水边界;南北边界与地下水等水位线基本垂直。

(2) 垂向边界。南宫地下水水库库区内,中上更新统和全新统之间有一层连续性很好的黏土层,具有良好的隔水效果,可作为地下水水库的底部边界。

6.2 特征水位和特征库容的确定

地下水水库的特征水位包括正常蓄水位、现状地下水水位和死水位,特征库容包括腾空库容、调蓄库容和总库容,特征水位和特征库容的关系见图 14,其中腾空库容和调蓄库容是决定地下水水库调蓄能力的重要因素。

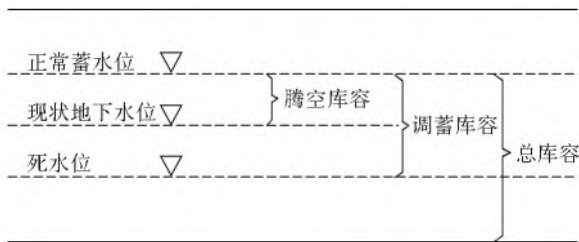


图 14 地下水水库特征水位与特征库容

Fig. 14 Characteristic water level and capacity of underground reservoir

正常蓄水位指在不引起环境恶化的长期储水条件下,地下水水库存储最大水量时所达到的水位值。根据前人的研究成果,南宫地下水水库的地下水临界埋深在 4 m 左右,正常蓄水位为 23~30 m。

现状地下水水位指目前地下水水位的分布情况。本次研究选取 2017 年 7 月的地下水水位作为地下水水库的现状地下水水位,水位为 4~18 m。

死水位指在不发生环境问题并且单井出水量没有明显减小的前提下地下水水库的最大疏干水位,该水位对应的库容称为死库容。根据前人的研究成果,南宫地下水水库的死水位为 7~14 m。

6.3 调蓄能力计算

本次采用容积法计算地下水水库的库容。首先根据含水层的岩性、地层沉积特征和含水层的结构特征,将研究区分为 3 个区域,分区见图 15,各分区特征见表 4。

根据上述分区分别求各分区的调蓄库容。调蓄库容公式为

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \mu_i h_i A_j \quad (8)$$

$$Q_{\text{总库容}} = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (9)$$

式中: Q_j 为第 j 分区库容量, m^3 ; μ_i 为 i 类砂体的给水度; h_i 为 i 类砂体在各分区范围内的平均厚度, m ; A_j 为第 j 分区的面积, m^2 ; $Q_{\text{总库容}}$ 为库容量, m^3 。

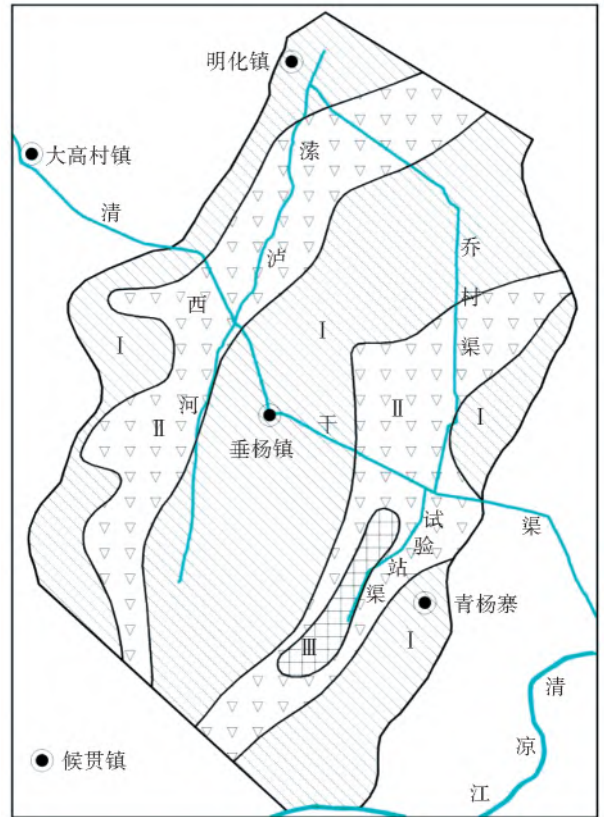


图 15 库容分区

Fig. 15 Partition map of storage capacity

表 4 分区特征

Tab. 4 Partition feature table

分区	岩性	总厚度/ m	调蓄 厚度/m	腾空 厚度/m	给水度	面积/ km^2
I	粉砂	4.58	3.01	1.12	0.12	154.62
	细沙	2.42	1.26	0.50	0.16	154.62
	中砂	0.37	0.26	0	0.18	154.62
II	粉砂	4.53	2.58	1.16	0.12	93.07
	细沙	4.72	2.18	0.51	0.16	93.07
	中砂	0.41	0.41	0	0.18	93.07
III	粉砂	7.02	6.52	0.99	0.12	5.53
	细沙	3.64	0.39	0	0.16	5.53
	中砂	1.60	0	0	0.18	5.53

各分区砂体的厚度根据钻孔资料确定,给水度的取值依据 1977—1979 年在南宫进行的研究。基于上述的计算方法及确定的参数,计算得研究区总库容为 3.21 亿 m^3 ,调蓄库容为 1.87 亿 m^3 ,腾空库容为 0.77 亿 m^3 。

7 结论

通过开展滦泸河河道入渗试验,对地下水水位和水量变化特征进行分析,得出以下结论。(1) 试验期

间,累计入渗量为189.28万 m^3 ,入渗比例为80.54%。(2)滹沱河I-I'断面和II-II'断面入渗水河道处的垂向渗透速度为10.81、10.72 m/d,其大小与包气带粉砂和粉质黏土比例有关;水平扩散速度为1.69、2.38 m/h,其大小与水位变动带岩性有关。(3)由于I-I'断面垂向渗透速度大于II-II'断面,而水平扩散速度小于II-II'断面,所以I-I'断面形成的水丘相比II-II'断面较为明显且不易消散。(4)监测孔中水位变化受日入渗水量和水力坡度的共同影响,监测孔距离入渗场越近,日入渗水量和水力坡度对其影响越大。(5)地下水库总库容为3.21亿 m^3 ,调蓄库容为1.87亿 m^3 ,腾空库容为0.77亿 m^3 ,为区域水资源的调蓄提供了足够的空间。

本次研究对于南宫地下水库入渗场位置选择以及区域水资源调蓄具有指导作用,对于华北地区通过地下水库进行区域水资源调蓄具有一定的借鉴意义。研究不足之处在于受实际条件的限制,地下水位监测孔不足,对地下水丘的完整性造成了一定程度的影响。建议今后有条件时增加监测孔数量,以便获取更加科学的试验成果。

参考文献(References):

- [1] 李旺林. 地下水库设计理论与工程实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2012. (LI W L, Design Theory and Engineering Practice of Ground Reservoir[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 李砚阁. 地下水库建设研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2007. (LI Y G, Ground Reservoir Construction Study[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 陈望河. 河北地下水[M]. 北京:地震出版社,1999. (CHEN W H, Hebei Groundwater[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 刘家祥,蔡巧生. 北京西郊地下水库研究[M]. 北京:地质出版社,1988. (LIU J X, CAI Q S. Study on Underground Reservoirs in the Western Suburbs of Beijing [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1988. (in Chinese))
- [5] 贺屹. 地面水-潜水-深层水(SPD)人工补给系统实验研究[D]. 西安:长安大学,2003. (HE Y. Experimental study on artificial recharge system of surface water diving deep water(SPD)[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese))
- [6] 张增勤,冯创业,韩永涛,等. 滹沱河大型入渗试验地下水补给量计算[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(5): 99-102. (ZHANG Z Q, FENG C Y, HAN Y T, et al.

Calculation of groundwater recharge during a large infiltration test in the Hutuo River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(5): 99-102. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J.1201.2013.05099.

- [7] 冯创业,张增勤,赵志超,等. 滹沱河大型入渗试验及其入渗能力计算[J]. 水文地质工程地质,2013,40(3):19-23. (FENG C Y, ZHANG Z Q, ZHAO Z C, et al. Large scale infiltration test and infiltration capacity calculation of Hutuo River[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2013,40(3): 19-23. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2013.03.004.
- [8] 陈文婧,田晓华,张鹏,等. 南宫地下水库回灌试验工程研究报告[R]. 石家庄:河北水文工程地质勘察院,2019. (CHEN W J, TIAN X H, ZHANG P, et al. Study report on the reinjection test project of Nangong underground reservoir [R]. Shijiazhuang: Hebei Institute of hydrogeology, 2019. (in Chinese))
- [9] 袁瑞强,宋献方,刘贯群. 现代黄河三角洲上部冲积平原降水入渗补给量研究[J]. 自然资源学报,2010,25(10):1777-1785. (YUAN R Q, SONG X F, LIU G Q. Study on recharge of precipitation infiltration in the upper alluvial plain of the modern Yellow River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(10): 1777-1785. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2010.10.015.
- [10] 霍思远,靳孟贵,朱常坤,等. 运用温度示踪法确定稳定入渗补给速率[J]. 水利学报,2019,50(6):761-772. (HUO S Y, JIN M G, ZHU C K, et al. Determination of steady infiltration recharge rate by temperature tracing method [J]. Journal of Water Conservancy, 2019,50(6): 761-772. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20190280.
- [11] 刘廷玺,朱仲元,马龙,等. 通辽地区次降雨入渗补给系数的分析确定[J]. 内蒙古农业大学学报,2002,23(2):34-39. (LIU T X, ZHU Z Y, MA L, et al. Analysis and determination of subrainfall infiltration coefficients in Tongliao area[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2002, 23(2): 34-39. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-3575.2002.02.008.
- [12] 郭洪起. 沧州区域现状条件下年降雨入渗补给系数分析[J]. 地下水,2009,31(1):42-43. (GUO H Q. Analysis of the feed coefficients of precipitation infiltration in Cangzhou area [J]. Underground Water, 2009,31(1): 42-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2009.01.012.
- [13] 史良胜,蔡树英,杨金忠. 降水入渗补给系数空间变异性分析[J]. 水资源研究,2009,27(3):1-4,12. (SHI L S, CAI S Y, YANG J Z. Spatial variability analysis of the feed coefficients of precipitation infiltration [J].

- Water Resource Research, 2009, 27 (3): 1-4, 12. (in Chinese))
- [14] 张光辉,费宇红,申建梅,等.降水补给地下水过程中包气带变化对入渗的影响[J].水利学报,2007,38(5):611-617. (ZHANG G H, FEI Y H, SHEN J M, et al. Influence of unsaturated zone thickness on precipitation infiltration for recharge of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (5): 611-617. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2007.05.016.
- [15] 张平,李日运.降雨入渗补给地下水的影响因素[J].辽宁大学学报(自然科学版),1999,26(2):118-122. (ZHANG P, LI R Y. The affecting factors of under groundwater supplied by rain penetration[J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 1999, 26(2): 118-122. (in Chinese))
- [16] 王锴,杨泽元,黄金廷,等.毛乌素沙地风沙滩区降水入渗响应研究[J].世界地质,2019(2):1-9. (WANG K, YANG Z Y, HUANG J T, et al. Study on the response of precipitation infiltration in aeolian sand beach area of Maowusu[J]. World Geology, 2019(2): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2019.02.029.
- [17] 李昊旭,邵景力,崔亚莉,等.不同作物覆盖对农业区地下水入渗补给的影响分析[J].水文地质工程地质,2019,46(2):57-65. (LI H X, SHAO J L, CUI Y L, et al. Analysis of the influence of different crop cover on groundwater infiltration supply in agricultural area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46 (2): 57-65. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.02.09.
- [18] 仵彦卿.多孔介质渗流与污染物迁移数学模型[M].北京:科学出版社,2012. (WU Y Q. Mathematics Method of Flow and Contaminant in Porous Media [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)).
- [19] 李全文,常金源,徐文刚,等. Geostudio 软件模拟降雨入渗过程中边界条件的探讨[J].水利规划与设计,2019(2):54-57,87. (LI Q W, CHANG J Y, XU W G, et al. Discussion on the boundary conditions of rainfall infiltration process by Geostudio software [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(2): 54-57, 87. (in Chinese))
- [20] 夏森林,保长林,安生霞,等.湿陷性黄土雨水入渗规律试验研究[J].青海大学学报,2019,37(6):59-65. (XIA S L, BAO C L, AN S X, et al. Experimental study on rainwater infiltration law of collapsible loess [J]. Journal of Qinghai University, 2019, 37 (6): 59-65. (in Chinese)) DOI:10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2019.06.009.
- [21] 程文举,席海洋,张经天.敦煌阳关西土沟流域高含沙洪水河道入渗特征分析[J].水土保持学报,2019,33(6):72-78,85. (CHENG W J, XI H Y, ZHANG J T. Analysis of infiltration characteristics of high sediment concentration flood channel in Xitugou watershed, Yangguan, Dunhuang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (6): 72-78, 85. (in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.010.
- [22] 张宇,黄鹤,吕军,等.潮白河冲洪积扇地质结构与地下水动态模拟研究[J].东北水利水电,2019,37(11):51-53,72. (ZHANG Y, HUANG H, LYU J, et al. Study on the geological structure of the alluvial proluvial fan of Chaobai River and the dynamic simulation of the underground reservoir [J]. Northeast Water Conservancy and Hydropower, 2019, 37 (11): 51-53, 72. (in Chinese)) DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2019.11.021.
- [23] 杜玉鹏,田堪良,张爱军,等.黄土地区不积雨条件下降雨入渗及其湿润锋移动规律[J].水电能源科学,2019,37(10):9-12,190. (DU Y P, TIAN K L, ZHANG A J, et al. The law of rainfall infiltration and its wetting front movement under the condition of no accumulated rain in Loess area [J]. Hydropower and Energy Science, 2019, 37(10): 9-12, 190. (in Chinese))
- [24] 杨郑秋,杨杨,邵景力,等.基于 MODFLOW-CFP 的岩溶水模型降雨非线性入渗补给研究:以湖南省香花岭地区为例 [J]. 中国岩溶, 2019, 38 (5): 691-695. (YANG Z Q, YANG Y, SHAO J L, et al. Study on rainfall nonlinear infiltration supply of karst water model based on MODFLOW-CFP: Taking Xianghualing area of Hunan Province as an example [J]. Carso-logica Sinica, 2019, 38(5): 691-695. (in Chinese))
- [25] 徐旭,席越,姚文娟.基于降雨入渗全过程的非饱和湿润峰模型[J].水利学报,2019,50(9):1095-1102. (XU X, XI Y, YAO W J. Unsaturated wet peak model based on the whole process of rainfall infiltration [J]. Journal of Water Conservancy, 2019, 50 (9): 1095-1102. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20190391.
- [26] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J].土壤学报,2020,57(2):296-306. (WANG C S, YANG X N, SUN W Y, et al. Soil water storage capacity and infiltration law in loess hilly gully area under extreme rainstorm conditions [J]. Soil Journal: 2020, 57 (2): 296-306 (in Chinese))
- [27] 陈旺旺,刘刚,刘畅,等.土体非饱和和渗透特性对降雨入渗的影响[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):71-75. (CHEN W W, LIU G, LIU C, et al. Influence of unsaturated permeability of soil on rainfall infiltration [J]. Journal of Water Conservancy and Construction

Engineering, 2019, 17(4): 71-75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2019.04.012.
 [28] 何佳欢, 许增光, 柴军瑞, 等. 某地下水库在不同降雨条件下非稳定渗流分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 56-66, 88. (HE J H, XU Z G, CHAI J R,

et al. Unsteady seepage analysis of an underground reservoir under different rainfall conditions[J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Technology, 2019, 17(3): 56-66, 88. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0060.

Surface water infiltration test in the central plain of north China:

A case study of Suolu River, Nangong

SONG Haonan, CHEN Wenjing, TIAN Xiaohua, TIAN Zhanhui, YANG Zhiguang, YOU Bing

(Exploration Institute of Hydrogeological and Engineering Geology in Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Haihe River basin located in the north China plain, having serious threat of water shortage. To improve the current groundwater environment, the underground reservoir storage function should be fully utilized to use the groundwater funnel formed for many years by implementing the artificial and natural regulation and storage. In the central part of north China plain, soil properties are unfavorable to groundwater storage and surface water infiltration. A surface water infiltration test was carried out in the river belt to obtain the maximum underground storage space and provide a good strategy for the rational utilization of water resources.

The infiltration test was carried out at Fanlu River, and the capacity of groundwater reservoir regulation and storage and the variation characteristics of groundwater level were studied by volume method and surface water infiltration test, which may provide a basis for water resource reserve planning in the Paleo-river area of north China plain. The experimental area of surface water infiltration was selected in the Nangong Gulu River, and monitoring data was obtained by artificial water diversion for 1.5 months, and the variation characteristics of groundwater level and water quantity and infiltration amount were studied.

The results showed that the infiltration rate of the dry river reached 80.54%. The vertical seepage velocity of I-I' and II-II' river section in the upper and lower reaches of the Suolu river was 10.81 m/d and 10.72 m/d, and the horizontal diffusion velocity was 1.69 m/h and 2.38 m/h. The vertical seepage velocity of I-I' section was greater than that of II-II' section, and the horizontal diffusion velocity was less than that of II-II', the water dome formed by I-I' section was more obvious than that of II-II' section, and it was not easy to dissipate. The calculation results showed that the storage capacity of the test area was $1.87 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Based on the analysis of groundwater level and water volume variation characteristics in the infiltration test of the Fanlu River, the following conclusions are drawn: (1) During the test, the penetration ratio was 80.54%. (2) Vertical permeation velocities at sections I-I' and II-II' of the Fanlu River are 10.81 m/d and 10.72 m/d, which is related to the ratio of silt and silty clay in the aeration zone. The horizontal diffusion velocity of infiltrated water is 1.69 m/h and 2.38 m/h, which is related to the lithology of water level variation zone. (3) As the vertical penetration velocity of section I-I' is greater than that of section II-II' and the horizontal diffusion velocity is lower than that of section II-II', the formation of water dunes in section I-I' is more obvious than that of section II-II' and it is not easy to dissipate. (4) The change of water level in the monitoring hole is affected by both daily infiltration water volume and hydraulic gradient. The closer the monitoring hole to the infiltration field, the greater the influence of daily infiltration and hydraulic slope. (5) Groundwater reservoir total reservoir capacity is $3.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, the storage capacity is $1.87 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the empty storage capacity is $0.77 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively, which provides enough space for regional water resource storage. This study has a guiding significance for the selection of seepage site of Nangong groundwater reservoir and regional water resource regulation and storage and has certain reference significance for regional water resource regulation and storage through groundwater reservoir in north China. The deficiency of the research lies in the limitation of practical conditions, and the lack of monitoring holes of groundwater level has affected the integrity of groundwater dunes. It is suggested that the number of monitoring holes should be increased when conditions permit, to obtain more scientific test results.

Key words: Suolu River; infiltration test; infiltration amount; underground reservoir; storage capacity