

雨洪水回灌过程中堵塞滤层特征试验

童 坤¹, 束龙仓¹, 黄修东², 刘 波¹, 杨 超³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 青岛市水文局, 山东 青岛 266071; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要 采用室内砂柱试验模拟雨洪水回灌条件下含水层的堵塞过程, 通过测定堵塞层的渗透系数和渗滤速率的变化分析回灌过程中的物理堵塞特征。试验结果显示, 在回灌后 36 h, 砂柱上部 (25 ~ 40 cm) 的渗透系数明显减小, 由初始的 6.58 m/d 减小到 3.72 m/d, 而中下部 (40 ~ 70 cm) 的渗透系数变化很小, 由初始的 6.45 m/d 减小到 5.25 m/d; 比较悬浮物质量浓度分别为 50 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L 和 400 mg/L 的回灌水回灌过程表明, 悬浮物质量浓度越高, 砂层的渗透速率下降越快; 对比分析回灌前后的悬浮物颗粒分结果表明, 回灌后的悬浮物 (砂层上部淤泥层) 出现细化现象; 回灌过程中在砂柱表面形成的淤泥层和砂层上部的淤堵是整个含水层堵塞失效的主要原因。

关键词 雨洪水回灌; 物理堵塞; 悬浮物质量浓度; 渗滤速率

中图分类号: TV138 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2011)04-0052-04

Characteristics of mechanical clogging in rain-flood infiltration system / TONG Kun¹, SHU Long-cang¹, HUANG Xiu-dong², LIU Bo¹, YANG Chao³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology Bureau of Qingdao, Qingdao 266071, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : The mechanical clogging process of aquifer under rain-flood infiltration was simulated by means of the laboratory tests on sand columns. The characteristics of mechanical clogging were analyzed by measuring the variations of permeability coefficient and infiltration rate of the clogging layer during the infiltration process. The test results show that 36 h after the infiltration, the permeability coefficient at the upper part (25-40 cm) of the sand column significantly decreases, from the initial 6.58 m/d to 3.72 m/d, and that at the middle and lower parts (40-70 cm) has small change, from the initial 6.45 m/d to 5.25 m/d. A comparison among the processes of infiltrated water with concentrations of suspended sediment of 50, 100, 200 and 400 mg/L indicates that the higher the concentration, the faster the decrease of the infiltration rate of silt layer. A comparison of the grain sizes of suspended sediment before and after infiltration shows that the grain size of suspended sediment (surface muddy layer of the silt layer) appears fine phenomenon after infiltration. The muddy layer formed on the surface of the sand columns and the clogging at the upper part of the silt layer during the infiltration process are the main causes for the clogging failure of the whole aquifer.

Key words : rain-flood infiltration; mechanical clogging; suspended sediment concentration; infiltration rate

地下水人工回灌作为实现地表水与地下水联合调蓄目标的关键技术之一, 已经在国内外, 尤其是在西方国家得到了广泛应用。实践经验表明, 在有条件的地区, 尤其是干旱、半干旱地区, 积极开展地下水人工回灌, 对缓解缺水问题, 提高水资源利用率, 实现地表水与地下水在时间和空间上的联合调度具有重要意义^[1-2]; 另外, 地下水人工回灌还是控制由于地下水过量开采等原因造成的环境地质问题 (如地面沉降、海水入侵) 和改善地下水水质的主要手段之一^[3-4]。

地下水人工回灌虽然具有许多优点, 在我国也受到了充分关注, 但却并没有大范围的推广应用, 很重要的一个原因就是回灌过程中堵塞问题严重影响回灌工程的补给效率及使用寿命。在地下水人工回灌系统中, 导致工程失败的最主要原因就是堵塞问题^[5-7]。即便是以经过预处理的雨洪水作为回灌水源, 也仍有可能发生严重的堵塞问题并导致回灌工程的报废^[7-8]。在我国也有很多因堵塞问题导致回灌工程补给效率降低的例子^[9-12]。由于堵塞机理的复杂性, 在回灌工程中完全控制堵塞是不可能的, 而

要有效地控制堵塞,提高回灌工程的补给效率,就必须对堵塞的机理和堵塞条件下的渗流规律有深入的了解。

研究认为,与用于回灌的河水或再生废水相比,雨洪水具有历时短、悬浮颗粒含量高、有机质含量较低、悬浮物粒径范围大的特性,在生物、化学堵塞还未充分发展的短历时内,雨洪水中悬浮的颗粒引起的物理堵塞往往占据主导地位^[13],化学和生物堵塞对入渗速率变化的影响非常小,有时甚至可以忽略^[14]。因此,本次试验的主要目的是在实验室环境下模拟雨洪水回灌系统中的物理堵塞过程,试验装置包括了模拟入渗的砂柱,配制回灌水悬浮物的泥沙和雨洪水回灌中典型的砂砾石滤层。

1 试验材料和方法

1.1 材料

试验装置如图 1 所示,砂柱由无色有机玻璃制成,总高为 90 cm,砂柱的内径 $r = 30\text{ cm}$,砂柱外侧布设 5 根测压管,分别在距砂柱顶部 25 cm、40 cm、50 cm、60 cm、70 cm 处,同时在柱底开有 1 个出流孔,用于取水样以及测出流流量。取样口与测压管内径均为 3 mm。取样口口部贴有不锈钢丝网防止介质颗粒堵塞取样管管口。

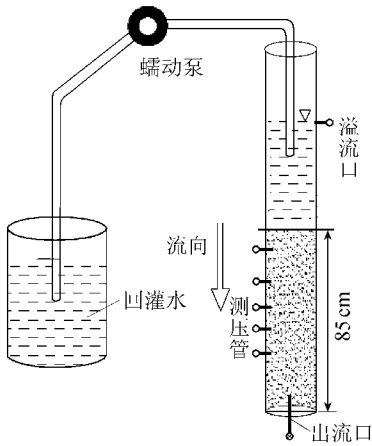


图 1 试验装置示意图

从本次对研究区(北京平谷盆地)雨洪水的测试结果看,悬浮物质量浓度普遍偏高,最大值高达 273 mg/L,50% 的雨洪样品悬浮物质量浓度在 15 mg/L 以上,平均值为 35 mg/L^[14]。试验使用的回灌水悬浮物的质量浓度分别为 400 mg/L(模拟悬浮物质量浓度较高的雨洪水),200 mg/L,100 mg/L,50 mg/L,悬浮物的密度为 1.789 361 g/m³,孔隙度为 0.501 405,渗透系数为 $6 \times 10^{-4}\text{ m/d}$ 。悬浮物质量浓度为 400 mg/L 的雨洪水配制完毕后,打开循环水泵使悬浊水在水箱中循环流动,以防止悬浮颗粒沉淀,同时用取样瓶取 200 mL 水,采用美国贝克曼库尔特

有限公司生产的 LS13320 全自动激光粒度分析仪测定回灌水悬浮物(即回灌前)的粒径分布,如图 2 所示,砂柱内部砂砾石的颗粒级配曲线如图 3 所示。

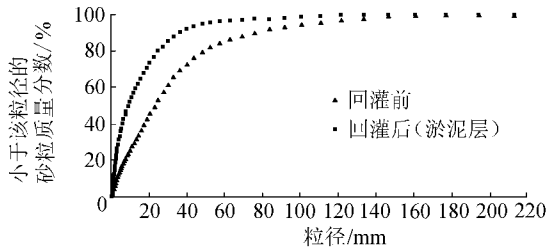


图 2 回灌前后悬浮物颗粒级配

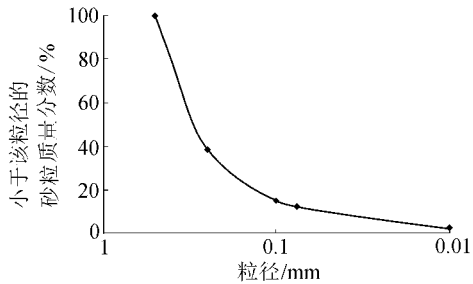


图 3 砂砾石滤层的颗粒级配曲线

1.2 试验方法

用配置好的雨洪水分别进行回灌,保持回灌水定水位为 40 cm,记录测压管读数,用量筒记录出流量。在回灌过程中,分别观测 5 根测压管的读数,每 12 h 测 1 次,并且记录出流量,渗透系数 K 由达西定律 $K = q\Delta l / (s\Delta h)$ 计算,直到砂柱内的 K 达到稳定。其中 q 为所测的出流量, Δl 为取样口之间的距离, A 为过水断面面积(即试验砂柱的断面面积), Δh 为对应取样口的测压管的水头差。

配置不同悬浮物质量浓度的雨洪水对砂柱进行回灌,分析砂柱从开始未饱和状态直至最后的渗滤速率变化。

2 结果分析

在回灌试验过程中,对砂柱顶部、中下部渗透系数、测压管水头和渗滤速率进行实时观测,从而保证可以完整地描述试验过程中砂柱由于回灌而发生的堵塞现象,进而分析回灌过程中砂柱渗流的变化过程和堵塞的机理。

2.1 渗透系数变化

已有研究表明,当通过多孔介质的悬浮物颗粒体积小于孔隙体积,且颗粒的粒径小于孔隙直径时,微粒即可进入介质孔隙,并穿过孔隙在介质中运动;否则,微粒将被阻挡在孔隙外^[15]。

此次试验中,首先用清水对砂柱进行回灌,在砂柱达到饱和状态时测定其渗透系数;其次,用悬浮物质量浓度为 400 mg/L 的雨洪水对砂柱进行回灌,在

回灌的起始阶段,回灌水中的悬浮物颗粒有很少部分进入砂柱表层的孔隙中使砂柱表层的孔隙度降低,渗透性减小,而大部分则滞留在砂柱表层形成薄膜,在回灌前与回灌后分别对砂柱的饱和和渗透系数进行测定,结果如表1所示。

表1 回灌前后含水层的渗透系数变化 m/d		
时间	距沙柱顶部 25~40 mm	距沙柱顶部 40~70 cm
回灌前	6.58	6.45
回灌后 12 h	5.00	5.65
回灌后 24 h	4.97	5.56
回灌后 36 h	3.72	5.25

从表1可以看出,在回灌后36 h,距砂柱顶部25~40 cm处的渗透系数明显减小,由初始(回灌前)的6.58 m/d减小到3.72 m/d;而中下部的渗透系数变化很小,由初始(回灌前)的6.45 m/d减小到5.25 m/d;严重淤堵区域约为1/3砂层厚度。砂柱表层渗透性的减弱是由砂柱表层的孔隙被回灌水中细的悬浮物颗粒填充以及滞留在砂柱表层的悬浮物颗粒阻碍了回灌水的入渗引起的,沉积在砂柱表层的悬浮物越来越多,最终形成完整致密的淤泥层。雨洪水地表渗滤过程中淤泥层形成的现象已经在国内外一些试验池和野外渗滤池的观测资料中出现,布尔恰克和安杰尔先通过对试验渗滤池的长期观测,发现雨洪渗滤池底部在回灌到一定时间后将形成淤泥层,砂土淤泥层的一般厚度为几厘米^[15]。图4和图5分别为从砂柱侧面拍摄的回灌48 h和96 h淤泥层的照片,从中可以看出回灌96 h淤泥层的厚度明显大于回灌48 h的淤泥层厚度。



图4 回灌48 h的淤泥层



图5 回灌96 h的淤泥层

2.2 渗滤速率的变化

配置悬浮物质量浓度分别为400 mg/L, 200 mg/L, 100 mg/L和50 mg/L的雨洪水直接对砂柱进行回灌,同时测定出流量,计算渗滤速率与时间的关系,如图6所示。

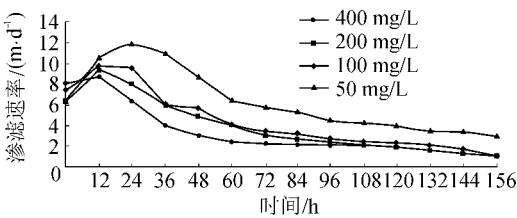


图6 渗滤速率随时间变化曲线

从图6中可以看出,悬浮物质量浓度越大,渗滤速率越小。悬浮物质量浓度高,附着在砂柱表层的悬浮物就多,砂柱表层较快地形成淤泥层,渗流阻力大,水头损失也就大,因此渗滤速率越小。悬浮物质量浓度对堵塞程度的影响直接反映在不同的悬浮物质量浓度的渗滤速率变化曲线上,从图6可以看出各组试验渗滤速率随时间变化的总趋势基本相同,都是先迅速增加到一个峰值,之后随时间增加呈非线性减小,曲线随时间增加而逐渐变得平缓。但是,不同的回灌水悬浮物质量浓度对渗滤速率的下降速率和幅度的影响非常显著,回灌水悬浮物质量浓度越高,堵塞越严重,渗滤速率下降曲线越陡峭,下降越迅速;相反,回灌水悬浮物质量浓度越低,渗滤速率下降曲线越平缓。

由图6可知,砂柱渗滤速率经过了迅速增大到一峰值后快速减小,然后又缓慢变小的过程。回灌开始后渗滤速率迅速变大,这是因为回灌后砂样含水率迅速增大,相应的导水率随含水率的增大而增加,因此渗滤速率随之变大,当整个砂柱达到饱和状态时渗滤速率也达到一个峰值,随着悬浮物逐渐沉积在砂柱的表层,造成砂柱上部渗透系数降低,渗滤速率也随之减小,而一旦砂柱的表层形成完整的淤泥层,砂柱入渗介质就变成了2个单元,即上部的淤泥层弱透水层和下部的砂样。淤泥层透水性极差,因此回灌后期砂柱的入渗速率主要取决于上部淤泥层的透水能力。

2.3 悬浮物粒径的变化

当悬浮物质量浓度为400 mg/L的雨洪水回灌试验完成后,收集表层的淤泥层进行晒干和筛分等试验,结果如图2所示。

由图2可知,回灌一段时间后,淤泥层出现了细化现象。这主要是因为悬浮物中的粗颗粒率先沉降,堵塞砂层,使砂层孔隙度减小,而后沉降的细颗粒受阻,只能大量落淤于砂层表面,最终使悬浮物出现细化。

2.4 渗滤速率预测

在地表渗滤系统入渗速率预测方面,Bouwer根据描述入渗问题的Green-Ampt模型提出了雨洪回灌入渗补给速率的计算公式^[14]:

$$v = \frac{K(h_w + L_f - h_{we})}{L_f} \quad (1)$$

式中: v 为入渗速率; K 为润湿区的渗透系数; h_w 为土壤上部回灌水的高度; L_f 为润湿区的长度; h_{we} 为润湿锋的负压水头^[16]。

Green-Ampt 模型研究的是初始干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题,在精度要求不高的情况下,式(1)可以用来预测回灌入渗效率,但很难准确地确定参数 K 和 h_{we} ,更重要的是,式(1)没有考虑回灌过程中堵塞的影响,因此只适用于回灌中没有形成淤塞层的情况。在本次实验中取 $h_w = 40 \text{ cm}$, $h_{we} = -30 \text{ cm}$, $L_f = 85 \text{ cm}$,由表 1 可知, $K = 6.45 \text{ m/d}$,得到此时的入渗速率 $v = 11.76 \text{ m/d}$,与试验得到的 $v = 11.55 \text{ m/d}$ 非常接近。

当堵塞淤泥层形成后,堵塞层的渗透性远低于包气带土壤的渗透性,它降低了入渗速率并且成为入渗过程的主要控制因素,因此可以用式(2)来表示入渗速率:

$$v = \frac{K_c(H_w - h_{ae})}{L_c} \quad (2)$$

式中: K_c 为淤塞层的渗透系数,由变水头测得 $K_c = 8 \times 10^{-4} \text{ m/d}$; H_w 为回灌水的水头; h_{ae} 为渗滤土壤层负压水头,一般取 $h_{ae} = 2h_{we}$; L_c 为淤塞层的厚度。

由式(2)可知,入渗速率随淤泥层厚度的增加而减小,即回灌时间越长,淤泥层厚度越大,入渗速率越小。在试验中用悬浮物质量浓度为 400 mg/L 的雨洪水对砂柱进行回灌,132 h 后得到淤泥层的堵塞厚度 $L_c = 0.005 \text{ m}$ 。这样可以算出 $v = 0.12 \text{ m/d}$,与试验所得的回灌后期渗滤速率变化缓慢时的数据大致吻合。

3 堵塞过程分析

经过不同悬浮物质量浓度的雨洪水回灌试验后,认为堵塞部位可以分为 2 个区域:①淤泥层。形成于砂层的表部,渗透性能最差。②淤堵层。也分为浅层淤堵层和深层弱淤堵层,前者形成于砂层的上部,其渗透性能强于淤泥层;后者形成于砂层的下部,其渗透性能与砂层堵塞前的相接近。砂层的堵塞过程也即这 2 个区域的形成过程。

回灌初期,水中粗颗粒的悬浮物开始率先沉降,并随着水流向下移动,滞留于砂层内部,随着回灌的进行,砂层内部的细颗粒不断积累,上部积累得多,越向下积累得越少,同时砂层表面积累的粗颗粒也不断增加,整体渗透速率逐渐减小;接着,表层淤积层逐渐形成,整体渗透速率不断下降,进入砂层内部

的细颗粒也不断减少;最后,一旦致密的淤泥层形成,回灌水中的悬浮物就很难进入细砂的孔隙中,完全沉积在淤泥层的表面。随着回灌时间的延长,淤泥层厚度逐渐增大,相当于在砂柱的表面逐渐形成一个渗透系数非常小的弱透土层。因此,淤泥层的粒径由下而上越来越小(图 2),出现细化现象,而且砂层的渗透能力从上至下越来越大,这和堵塞的过程是分不开的。

4 结 论

采用自行设计的砂柱试验模拟雨洪水地表渗滤系统入渗过程,试验结果表明:

a. 堵塞过程中,形成了淤泥层和砂层淤堵层 2 个区域。

b. 回灌水悬浮物颗粒进入砂柱表层的孔隙中引起砂柱渗透性减弱和逐渐沉积在砂柱顶部的悬浮物颗粒形成的淤泥层是造成堵塞的直接原因,砂柱渗透系数随回灌时间的延长而减小,砂柱上部堵塞程度最为严重,堵塞程度随入渗距离的深入而不断减小。

c. 淤泥层形成之后,悬浮物进入砂柱导致了砂柱中上部的渗透速率逐渐减小,整体回灌渗滤速率迅速减小。回灌时间越长,淤泥层厚度越大,渗滤速率也越小。在回灌过程中,淤泥层的形成是造成渗滤速率迅速下降的关键原因,而砂层的淤堵同样也降低了渗滤速率。同时,用公式对回灌淤泥层形成前后的试验进行检验,所得数据与回灌试验数据基本吻合。

d. 回灌后,淤泥层出现细化现象,主要是由于回灌过程中粗颗粒向下流失引起的。

e. 滤层表层的淤泥层和上部的淤堵是滤层失效的主要原因,只需清除表层淤泥层和清洗或更换上部滤层来解决失效问题,不必对整个滤层进行处理,实际工程中可以参考这个规律。

参考文献:

- [1] PETERS J H. Artificial recharge and water supply in the Netherlands, state-of the-Art and Futre Trends [C] // Proceedings of the 2st International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Anaheim :CA, 1988.
- [2] 刘家祥. 地下水人工回灌试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 1980(1): 31-38.
- [3] 王翠玲, 王飞. 地下水人工回灌对地面沉降控制的探讨 [J]. 山西建筑, 2007, 33(33): 142-143.
- [4] 李广贺. 水资源利用与保护 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

(下转第 64 页)

3 结 语

通过修正已有的 $k-\epsilon$ 紊流模型,建立了修正的 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型,对宁夏回族自治区中卫市境内的黄河大柳树—沙坡头河段的水流运动进行了平面二维数值模拟,并进行了一些算法上的改进,得到一些有益的结论:①对湍动能及其耗散率方程的部分参数进行了调整,并在动量方程中增加了体现弯道环流影响的项。通过对比发现,增加该项后数值模拟结果与实测结果吻合较好。②在弯道出口段添加了一小段顺直段,避免在出口段出现回流而影响计算的稳定性。③采用自适应算法确定不同子河段的糙率值,减少试算的工作量,提高了计算精度。④通过数值模拟发现,水面纵比降和横比降的绝对值均随着进口断面流量的增大而增大。

致谢:在本文完成过程中得到水利部黄河水利委员会宁蒙水文水资源局和沙坡头电厂的热心帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献:

[1] 吴修广,沈永明,郑永红,等.非正交曲线坐标系下二维水流计算的 SIMPLEC 算法[J]. 水利学报,2003,34(2): 25-30.

[2] PEZZINGA G. Velocity distribution in compound channel flows by numerical modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120: 1176-1198.

[3] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. J. Sci. Comput., 1986, 1: 3-11.

(上接第 55 页)

[5] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study[J]. Water Research, 2007, 41: 1433-1440.

[6] VIGNESWARAN S, RONILLO B S. A detailed investigation of physical and biological clogging during artificial recharge[J]. Water, Air & Soil Pollution, 1987, 35(2): 119-140.

[7] 阎葆瑞,庞炳乾,汤亚伯.人工补给条件下地下水水质及微生物作用的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 1983(5): 29-33.

[8] 郭茹,贾海峰,井艳文,等.污水回用,大势所趋——关于北京市污水回用的思考[J]. 北京水利, 2001(5): 42-43.

[9] 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): 21-25.

[4] SPEZIALE C G, THANGAM S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows[J]. Int. J. Engng. Sci., 1992, 30: 1379-1388.

[5] 赵小娥,钟杰,刘兴年,等. U 形弯道建闸对水流运动特性的影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 47-49.

[6] LIEN H C, HSIEH T Y, YANG J C, et al. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 1097-1108.

[7] JIN Y C, KENNEDY J F. Moment model of non-uniform channel-bend flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119(1): 109-124.

[8] 刘玉玲,刘哲.弯道水流数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2006, 24(2): 310-312.

[9] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[10] VRIEND H J D. Velocity redistribution in curved rectangular channels[J]. J. Fluid Mech., 2003, 107: 423-427.

[11] HAYASE T, HUMPHREY J A C, GREIF R. A consistently formulated quick scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedure[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 98: 108-118.

[12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.

[13] KANG H, CHOI S U. Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flow[J]. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2006, 51: 1319-1334.

[14] 吴持恭. 水力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2003.

[15] 张玉萍. 弯道水力学研究现状分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(5): 35-49.

(收稿日期 2010-01-08 编辑 高建群)

[10] 武景堂.山前平原天然河道人工补给地下水试验研究[J]. 河北地质学院学报, 1993, 16(1): 70-79.

[11] MARTIN T, MARTIN H S. Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 70: 37-62.

[12] 赵世平,刘建生,杨改强,等.粒径对土壤水分特征曲线的影响研究[J]. 太原科技大学学报, 2008, 29(4): 332-334.

[13] 黄修东.地下水人工回灌堵塞特征及机理试验研究[D]. 南京:河海大学, 2009.

[14] 普洛特尼科夫.地下水人工补给译文集[M]. 汪熊麟,胡淑琴,译.北京:地质出版社, 1987.

[15] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 1995.

(收稿日期 2010-11-19 编辑 方宇彤)