DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.01.004

地下咸水体抽水修复的模拟试验

李 琴[1],郑西来[1,2],崔 恒[1],张 健[1]

(1.中国海洋大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266100;
2.中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

摘要:根据青岛市大沽河下游咸水分布区水文地质条件,采集该地区代表性中砂进行砂槽模拟试验,分析了抽水量、抽水井的位置以及抽水持续时间对咸水体修复效果的影响。试验结果表明:进行抽水修复时,各观测点盐度依次降低,并且形成突降;抽水量越大,咸水的去除速率越高,修复时间越短,抽水量从 80.2 mL/min 分别增至 160.2 mL/min、240.2 mL/min 时,修复时间缩短为之前的 52.4% 和 34.9%;将抽水井安置在隔水边界附近,能够有效地抽取高浓度咸水,显著提高地下咸水体的整体修复效果;该试验条件下,抽水持续时间为 115 min 时,虽然结束抽水时的出水盐度为 0.274%,但是依靠自然修复仍然能够满足饮用水标准,相较于出水盐度为 0.10% 的抽水持续时间缩短了 30.3%,大幅降低修复成本,对咸水体的工程研究具有明显的经济意义。

关键词:地下咸水体;抽水;修复效率;盐度

中图分类号:P641.74 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2013)01-0014-04

Simulation study on pumping remediation of underground saltwater

LI Qin[1], **ZHENG Xilai**[1,2], **CUI Heng**[1], **ZHANG Jian**[1]

(1. *College of Environmental Science and Engineering*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*;
2. *Key Laboratory of Marine Environment and Ecology*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract: Based on the hydrogeological conditions of the underground saltwater distribution area in the lower reaches of the Dagu River in Qingdao City, we conducted sand tank experiments using typical medium sand samples in this area to investigate how the flux, location, and duration of pumping influence the remediation of saltwater. The simulation results indicate that salinity of the observation points decreased in sequence and sharply. The larger the pumping flux was, the higher the removal rate of saline water would be, and thus the shorter the needed remediation time would be. When the flux increased from 80.2 mL/min to 160.2 mL/min and 240.2 mL/min, the remediation time decreased to 52.4% and 34.9% of original time, respectively. When the pumping well was located near the impermeable boundary, it could effectively extract high-concentrated saline water and significantly improve the overall remediation effect. When the pumping duration was 115 min under the experimental conditions, though the pumped water salinity was 0.274% at the end of the pumping process, it met the drinking water standards through the natural recovery process, and the pumping duration was shortened by 30.3% compared to that with a pumped water salinity of 0.10%. This reduced the remediation cost to a significant degree and had obvious economic significance to remediation of underground saltwater.

Key words: underground saltwater; pumping; remediation efficiency; salinity

1 概 述

自然状态下的海岸带含水层存在指向海洋的水力梯度,咸淡水之间存在一个动态平衡[1]。但是,随着沿海经济的迅速发展和人口密度的不断增加,淡水需求量大幅上升,过度开采引起地下水位大幅

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001075);国家自然科学基金(41172209)

作者简介:李琴(1986—),女,硕士研究生,研究方向为地下水污染防治。E-mail: hhlqq@163.com

下降,导致海水入侵[2]。大沽河流域是青岛市的重要水源地,连续干旱的气候以及1981—1988年对地下水的超量开采造成大面积地下漏斗区,截至1998年,地下咸水体面积已超过70 km^2。该区域北部含水层与大沽河存在水力联系,并且大沽河常年水量充足,可以视为淡水边界;研究区南部是人工修筑的截渗墙。截渗墙的建立虽然阻止了咸水入侵的进一步发展,但同时也使得已经入侵的咸水体滞留在含水层中,给当地居民的生产和生活带来了极大的困难。

针对入侵的地下咸水体,可以通过抽水帷幕进行修复。1972年在美国奥克斯纳德河谷建立的抽水帷幕[3],在运行7个月后成功去除地下咸水体;刘兆昌等[4]认为,在缺乏足够回灌淡水的地区可以利用抽水方案进行修复;韩志勇等[5]利用MODFLOW对抽水帷幕的有效性进行验证,发现抽水对高浓度咸水的去除是有效的;同时,唐心强等[6]发现,在咸水楔内部抽水时能够引起咸水楔长度的指数型减小。

目前,对咸水体的修复研究主要停留在数学模型模拟方面,而应用物理模型进行的模拟研究相对较少。笔者在充分掌握大沽河下游地区水文地质条件的基础上,建立室内砂槽模型,对存在天然水体补给条件下的地下咸水体进行抽水修复模拟,研究连续抽水对咸水体修复效果的影响,为咸水体修复工程提供理论依据和数据支持。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

试验装置主要包括有机玻璃砂槽和抽水井两部分,如图1所示。其中有机玻璃砂槽(108 cm×14.5 cm×60 cm)由介质填充区和水室构成,两者之间存在均匀布孔的有机玻璃板,既能阻隔砂体又能保证含水介质面状均匀进水;在有机玻璃槽的正面安装5个电导电极,用以监测砂体中的浓度场变化。抽水井是将周身均匀布孔的PVC管(∅5 cm×55 cm)上缠绕金属滤网制成的。

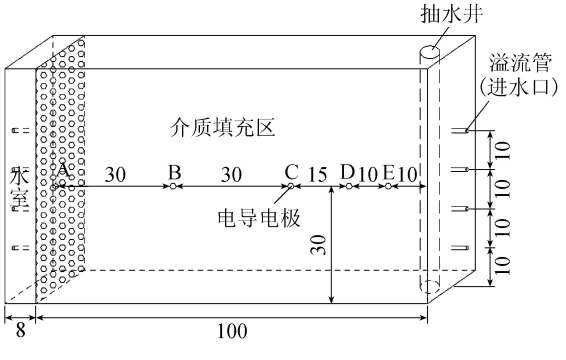


图1 试验装置示意图(单位:cm)

2.2 试验材料

试验所用含水介质取自大沽河下游李哥庄镇黄家屯村,利用比重计(含筛分)法对砂样进行粒径分析可知,平均粒径为0.689 mm,该砂样属于中砂。并且利用X射线衍射仪对砂样进行矿物分析,具体理化性质见表1。

表1 试验砂样的粒径级配与矿物成分

粒径范围/mm	质量分数/%	矿物成分	质量分数/%
4~2	11.7	石英	85.7
2~1	14.4	长石	6.4
1~0.5	40.7	白云石	2.1
0.5~0.25	17.5	角闪石	0.1
0.1~0.075	15.5	黏土矿物	3.0
<0.075	0.2		

该试验所用的淡水为自来水,其盐度为0.019%;而用于饱和砂体的咸水质量分数为0.5% 的氯化钠(NaCl)溶液,是将自来水中加入NaCl配制而成。

2.3 试验方法

在进行砂槽试验时,为充分模拟研究区域的边界特点,在砂槽左侧的水室注入淡水,作为淡水定水头边界,模拟研究区北部边界;砂槽右侧关闭进水口,作为隔水边界,模拟截渗墙;介质填充区通过充填含水介质并饱和咸水来模拟滞留的咸水体。具体的试验方法如下:

a. 抽水井与电导电极的安装。将PVC管周身打孔制成完整井,安装在砂槽右侧隔板处,利用Longer lead-2型蠕动泵进行定流量抽水;在电导电极的两铂片之间填充试验所用介质颗粒,然后将其安装在砂槽正面5个观测点处。其中,观测点A、B、C、D、E距离隔水边界分别为95 cm、65 cm、35 cm、20 cm、10 cm。

b. 填砂。首先向砂槽中充入一定量的水,然后将风干砂样分层装入砂槽,并不断搅拌使砂体均匀,总填砂高度为50 cm。

c. 饱水。从砂槽右侧进水口自下而上缓慢注入质量分数为0.5%的NaCl溶液,直至整个砂体的盐度分布均匀。

d. 边界控制。将左侧水室插入不透水隔板,迅速将其中的咸水换为淡水,并保持定水头(水头高度为40 cm)边界;砂槽右侧关闭进水口,形成隔水边界。

e. 修复方法。分别改变抽水量、抽水井的位置以及抽水的持续时间,对咸水体进行连续抽水。抽水过程中利用安装在砂槽中的电导电极观察其电导率的变化。

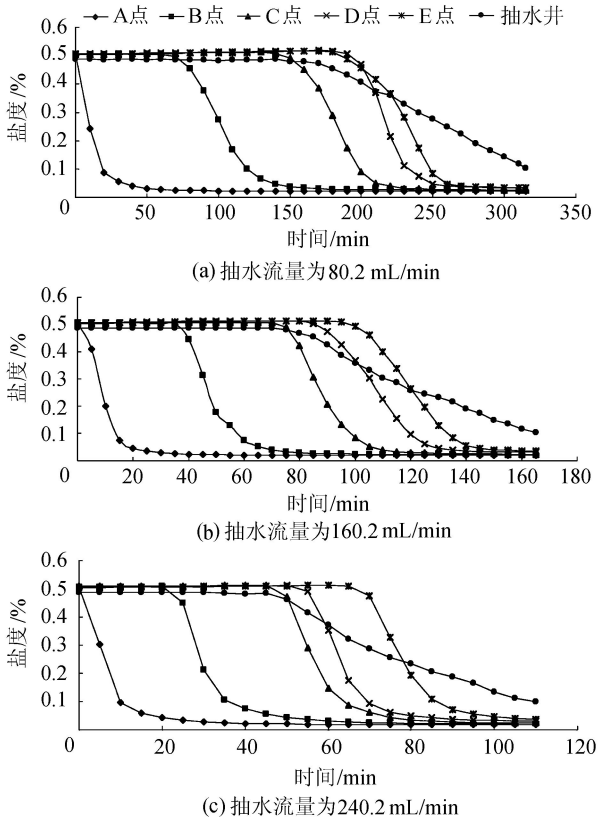
f. 标准曲线测定。测定各电导电极所测得的直读电导率(该电导率是由渗流液盐度和填充在两铂片间的含水介质共同决定的)与盐度之间的关系曲线,进而反映出砂槽中的盐度场变化。

3 结果与讨论

3.1 抽水量对咸水体修复效率的影响

无论是咸水体的现场修复试验还是数学模型模拟,抽水量是一个至关重要的影响因素。因此,本试验将抽水井安装在隔水边界处,通过蠕动泵控制抽水流量分别为 80.2 mL/min、160.2 mL/min、240.2 mL/min,当井的出水盐度达 0.1% 时,停止抽水。

在不同的抽水流量条件下,得到咸水体各观测点以及抽出水盐度随时间的变化曲线如图 2 所示。



(a) 抽水流量为80.2 mL/min

(b) 抽水流量为160.2 mL/min

(c) 抽水流量为240.2 mL/min

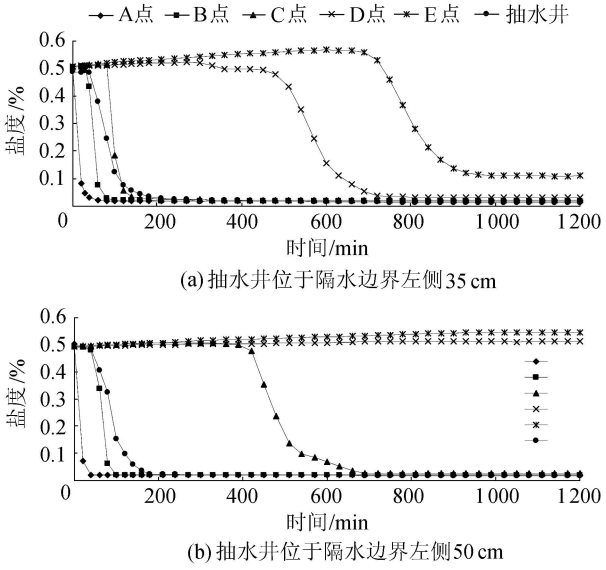
图 2 不同抽水量时各观测点盐度变化曲线

通过图 2 可以看出,在不同抽水量条件下,各观测点盐度均是由淡水边界向着隔水边界依次降低的,说明在抽水过程中随着降落漏斗的形成,淡水逐渐驱替咸水;各观测点的盐度变化趋势基本一致,起始的下降速率很快,形成突降,随后逐渐减小并趋于平缓,说明淡水在驱替咸水体过程中是以锋面形式推进的。通过不同观测点的盐度变化过程可以看出,越靠近隔水边界的观测点其盐度的降低速率就越慢。

另外,从图 2 可知,在流量为 80.2 mL/min、160.2 mL/min、240.2 mL/min 条件下,抽水井内的盐度降低至 0.1% 所需时间分别为 315 min、165 min 和 110 min。这是由于抽水流量增大,抽水井所形成的稳定降深会随之增加,其降深分别为 3.6 cm、7.8 cm、15.2 cm,由于淡水边界保持 40 cm 定水头,因此,淡水边界与抽水井内的水头差增大,淡水驱替咸水体所需要的时间也就越短。这与鞠晓明[7]对抽水量影响抽出处理系统优化时间的数值模拟有着相似的结论,即抽水流量增加,抽水系统的运行时间随之减少。

3.2 抽水井位置对咸水修复的影响

在抽水量为 160.2 mL/min 的条件下,将抽水井安装在隔水边界左侧 0 cm 处,各观测点盐度变化曲线如图 2(b)所示。改变抽水井的位置,将井安置在距离隔水边界 35 cm、50 cm 处,进行连续抽水,得到各观测点盐度随时间的变化曲线,如图 3 所示。



(a) 抽水井位于隔水边界左侧35 cm

(b) 抽水井位于隔水边界左侧50 cm

图 3 不同井位时各观测点盐度变化曲线

从图 2(b)和图 3 可知,在相同抽水流量条件下,抽水井的位置对咸水体的修复效果产生明显的影响。当抽水井位于隔水边界左侧 0 cm 处时,在 165 min 内所有观测点的盐度降低至 0.02%;而抽水井位于隔水边界左侧 35 cm 处时,前 165 min 内只有靠近淡水边界的 A、B、C 观测点的盐度降低至 0.02 % 左右, D 点在抽水 780 min 后盐度才降至 0.034%,而 E 点盐度则最终只能降至 0.11%;当抽水井位于隔水边界左侧 50 cm 处时,前 165 min 内只有 A 点和 B 点的盐度降至 0.02 % 左右,C 点在抽水 720 min 后盐度才降至 0.026 %,而 D 点和 E 点在 1 200 min 内盐度均未下降。由此可见,抽水井距离隔水边界越近,咸水体的整体修复效果越好,抽水所用的时间越短。

以上 3 种情况下,抽水井距离淡水边界越近,其抽出水的盐度降低速率就越快,这是由于靠近淡水边界时,单位时间内抽出水中所含淡水的比重越大,因此要提高咸水体的修复速率,应当优先抽取高浓度咸水,故抽水井应当靠近隔水边界布置,这与杨建华[8]的数值模拟结果一致。

3.3 抽水持续时间对咸水修复的影响

由图 2(b)可以看出,以 160.2 mL/min 的流量进行连续抽水 165 min,出水盐度达到 0.10%,已经

符合饮用水标准,而砂体中各监测点的盐度均已降至0.03%以下,因此可以缩短抽水的持续时间。当抽水持续时间分别为105 min、115 min、135 min时,连续观测各观测点在抽水过程以及恢复期的盐度变化曲线如图4所示。

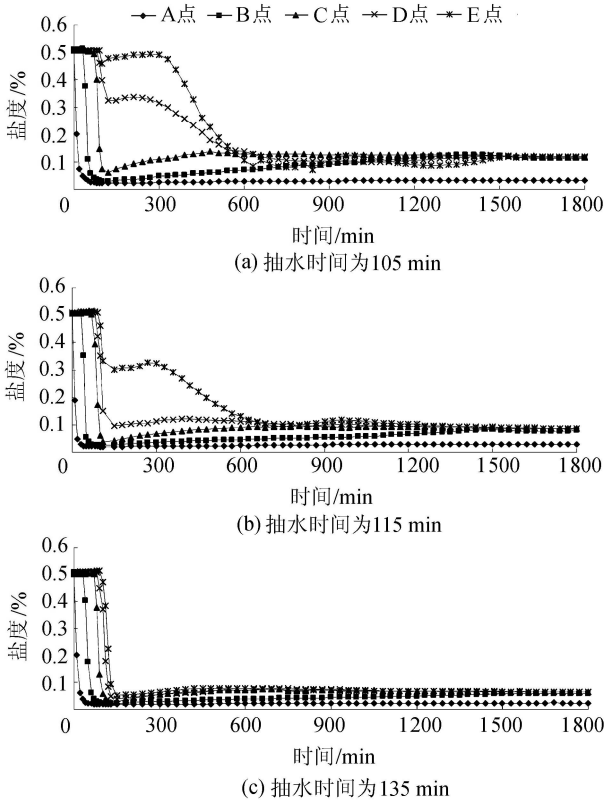


图4 不同抽水时间时各观测点盐度变化曲线

从图4可知,抽水时间越短,停止抽水时的出水盐度就越高,并且各观测点之间的盐度差异增大,其在天然水体补给条件下进行分子扩散时的盐度波动越大,达到稳定所需要的时间越长。这是由于在抽水过程中自然水体是以锋面形式对咸水体进行驱替的,A~E这5个观测点的盐度依次下降,因此抽水时间越短,锋面距离抽水井距离越远,砂体中残留的咸水体积增大,靠近抽水井的D、E观测点的盐度越高,当抽水结束时由于浓度差所引起的分子扩散动力就越大,最终稳定时的盐度也越高。

存在天然水体补给条件下的咸水体修复,不仅可以依靠抽水过程中河水对咸水进行驱替,而且停止抽水后降落漏斗的恢复过程以及砂体中不同部分由盐度差所引起的分子扩散均可以用于咸水体修复。如图4(a)所示,盐度变化主要分为3个阶段。首先在抽水的作用下河水对咸水进行驱替,盐度迅速下降;抽水结束后,降落漏斗恢复,D、E两点在浓度差的驱动下继续缓慢下降;最后,全部观测点盐度均趋于平稳。在该试验中抽水持续时间为115 min时,虽然抽水结束时的出水盐度为0.274%,E点盐度为0.29%,但经过将长时间的自然修复均可达到饮用水标准,相较于出水盐度为0.1%时的持续时间165 min,节约了30.3%的修复时间。

4 结 论

本文通过室内砂槽试验,模拟地下咸水体的抽水修复过程,研究不同因素对抽水修复效果的影响,得到以下结论:

a. 存在天然水体补给条件下的抽水修复过程中,淡水是以锋面的形式对咸水体依次进行驱替的。

b. 抽水量越大,抽水井的出水盐度降至0.1%所需要的时间越短,因此增大抽水流量可以加速地下咸水体的修复速率。

c. 抽水井距离隔水边界越近,抽取咸水的效率越高,对整个地下咸水体的修复效果越好。

d. 在该实验条件下,确定抽水持续时间为115 min时(停止抽水时的出水盐度为0.274%),依靠天然水体的自然修复,仍然可以满足对整个咸水体的修复,而且相较于出水盐度为0.1%的抽水时间165 min,缩短了30.3%的修复时间,降低修复成本。

参考文献:

[1] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社,1986: 179-180.

[2] ABDELHALEEM. Impact of pumping on saltwater intrusion in Gaza coastal aquifer, Palestine[D]. Nablus: Najah National University, 2007.

[3] MASHESHA A. 运用注水-抽水井系统控制海水入侵[J]. 水文水资源, 1998,19(3):20-22. (MASHESHA A. Control salt water intrusion using injection-pumping well system[J]. Hydrology and Water resources, 1998,19(3): 20-22. (in Chinese))

[4] 刘兆昌,张兰生,聂永丰,等. 地下水系统的污染与控制[M]. 北京:中国环境科学出版社,1991:532-536.

[5] 韩志勇,陈继红,李涛,等. 存在截渗墙情况下地下咸水恢复的优化方案[J]. 四川环境,2007,26(2):37-41. (HAN Zhiyong, CHEN Jihong, LI Tao, et al. Optimizing scheme to restore the saline groundwater under the condition of impenetrable wall[J]. Sichuan Environment, 2007,26(2):37-41. (in Chinese))

[6] 唐心强,左凤华,王虹,等. 地下水位升降和抽水对海水楔影响的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2008,8(2): 92-99. (TANG Xinqiang, ZUO Fenghua, WANG Hong, et al. Fluctuation in addition to the ground-water over-pumping[J]. Journal of Safety and Environment, 2008,8(2):92-99. (in Chinese))

[7] 鞠晓明. 地下水污染场地水力控制优化方案研究[D]. 北京:中国地质大学,2011.

[8] 杨建华. 帷幕防治海水入侵的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学. 2005.

(收稿日期:2012-02-04 编辑:高渭文)