

# 雨水回灌对深层承压含水层水质影响的模拟研究

李贺强, 邢国平, 王超

(天津大学 环境工程与科学学院, 天津 300072)

**摘要:** [目的] 揭示雨水回灌中污染物在深层承压含水层中的迁移扩散规律。[方法] 以常规指标氯化物( $\text{Cl}^-$ )为研究对象, 针对天津市市区第 IV 承压含水组, 应用地下水模拟软件(groundwater modeling system, GMS)中的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块分别进行地下水流场和溶质迁移模拟。模拟了 4 种不同的  $\text{Cl}^-$  质量浓度和水量条件对溶质运移的影响。[结果] 当溶质质量浓度相同时, 回灌水量增大 4 倍, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大约 1.44 倍; 当回灌水量相同时, 溶质质量浓度增大 2 倍时, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大约 0.92 倍。[结论] 回灌水溶质浓度和回灌水量对  $\text{Cl}^-$  在地下水中的迁移均有一定的影响, 而且回灌水量的影响大于溶质质量浓度的影响; 增大回灌水量、减小回灌水溶质浓度利于  $\text{Cl}^-$  的迁移扩散。

**关键词:** 雨水回灌; 流场模拟; 溶质运移

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0139-04

中图分类号: P641.8

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.026

## Simulation Study on Effects of Stormwater Recharge on Deep Confined Aquifer Water Quality

LI Heqiang, XING Guoping, WANG Chao

(School of Environment Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the contaminant transport of stormwater recharge in deep confined aquifer. [Methods] The groundwater flow modeling and solute transport simulation were studied by the Modflow and MT3DMS, which are two modules of groundwater modeling system (GMS), in the fourth confined aquifer of Tianjin City. And chloride ion( $\text{Cl}^-$ ), a common index, was used as object of the study. Four different kinds of the mass concentrations of  $\text{Cl}^-$  and the amounts of recharge water were simulated and analyzed. [Results] When the amount of recharge water increased 4 times and the solute concentration remained constant, the area of certain  $\text{Cl}^-$  concentration in the groundwater would increase 1.44 times; when the solute concentration increased 2 times and the amount of recharge water remained constant, the area of certain  $\text{Cl}^-$  concentration in the groundwater would increase 0.92 times. [Conclusion] Both the amount of recharge water and the mass concentration influence the transportation of  $\text{Cl}^-$  obviously, and the influence of the former tends to be greater than the latter. Meanwhile, either increasing the amounts of recharge water or reducing the solute concentrations are conducive to transferring and diffusing of  $\text{Cl}^-$ .

**Keywords:** stormwater recharge; flow field simulation; solute migration

天津市长期超量开采地下水, 造成地下水位持续大幅度下降, 形成了市区及近郊区等几个下降漏斗, 恶化了地质环境和生态环境, 加剧了地面沉降, 诱发一系列环境地质问题。为了解决上述问题, 利用雨水回灌进行人工补充地下水是一个新的方向。由于深层地下水的埋藏较深, 水文地质等检测勘察资料和手段不够齐全, 试验和现场研究等都存在着较大的难度, 随着各种地下水模拟软件的开发应用, 对人工回灌地下水水质影响的数值模拟研究也越来越多。张宗文等<sup>[1]</sup>采用地下水数值模拟软件 GMS, 模拟预测

了北京某地区面状污染源对水源地的影响情况。吴昌将等<sup>[2]</sup>采用软件 Visual Modflow, 预测模拟了呼和浩特及周边浅层地下水硝态氮污染的时空变化规律及趋势。目前, 国内相关学者的研究多集中在浅层地下水中污染物的迁移模型, 本文运用 GMS 软件研究深层低渗透性承压含水层中污染物的迁移规律。

## 1 研究背景

### 1.1 研究区基本情况

天津市地处华北平原东北部平原区, 松散岩类孔

收稿日期: 2014-01-01

修回日期: 2014-03-04

资助项目: 住房和城乡建设部“城市绿色发展生态技术研究与示范”(2012BAC13B00)

第一作者: 李贺强(1988—), 男(汉族), 河北省保定市人, 硕士研究生, 研究方向为城市雨水资源化。E-mail: liheqiangll@163.com。

隙水自上而下分为 4 个含水组,研究区目标层为天津市第Ⅳ含水组,该含水层为承压含水层。底界深度 400~500 m,含水层岩性主要为粉细砂,厚度多在 30~40 m,市区中南部可见中细砂,涌水量在 1 000~3 000 m<sup>3</sup>/d,导水系数 100~300 m<sup>2</sup>/d,其余地区涌水量在 500~1 000 m<sup>3</sup>/d,导水系数 50~200 m<sup>2</sup>/d,渗透性较差。该含水层也是市区及近郊的主要开采层,处于超采状态,虽然与其他含水层比,第Ⅳ含水组的开采量要小得多,但由于补给条件差,水位持续下降,在其周围形成了较大的水位下降漏斗,该含水层承压水等水位线为-70~-90 m<sup>[3]</sup>。

### 1.2 雨水回灌地下水的可行性

随着水资源的进一步短缺,雨水再利用成为研究热点。雨水一般具有雨量大,降雨季节集中等特点,以天津市为例,统计该市 1985—2012 年的月降水量,求得多年来各月份的平均降雨量,计算各月降水量占全年降水量的百分比。天津市 7 月占全年降水量的百分比最大,为 27.5%,7 月平均降雨量为 140.4 mm;8 月份次之,平均降雨量为 124.4 mm,占全年降水量的 24.3%;再次之是 6 月份,占全年降水量的 17.1%。天津城区道路雨水径流的污染物包括无机阴离子、重金属、有机污染物、营养盐等,其中氯化物的平均浓度为 27.88 mg/L<sup>[4]</sup>。Cl<sup>-</sup> 性质稳定,不易发生化学变化,较难被吸附,很难被微生物分解,选择 Cl<sup>-</sup> 作为示踪离子是比较理想的。对于水资源严重短缺的天津,将雨水处理达标后进行人工回灌补充地下水具有一定的必要性和可行性。

### 1.3 GMS 软件介绍

GMS (groundwater modeling system) 是由美国 Brigham Yung University 的环境模型研究实验室和美国军队排水工程试验站在综合 Modflow, MT3DMS, Modpath, Femwater, RT3D, UTCHEM, SEAM3D 等已有模型的基础上开发的一个综合性的,用于地下水模拟的可视化地下水模拟软件包。本研究中主要用 GMS 中的 Modflow 建立天津市第Ⅳ承压含水组的流场模型,在该模拟流场基础上运用 MT3DMS 软件建立 Cl<sup>-</sup> 运移模型,在具有多种类型边界和外部源汇项,考虑对流、弥散等情况下,模拟地下水中 Cl<sup>-</sup> 的浓度变化,着重分析回灌雨水中的污染物浓度和水量对污染物在地下水中迁移的影响,以期提高回灌水在低渗透性承压含水层中的迁移体系的认识。

## 2 地下水流场模拟

### 2.1 模型概化

根据研究区水文地质条件和地层岩性,将目标区

地下水系统概化成一层承压含水层,根据多年水位观察资料,该研究区地下水的动态变化较稳定,可将目标区地下水系统概化为平面二维稳定流地下水系统。

研究区含水组上边界和下边界无越流量,概化为不透水层。研究区边界不是天然边界,根据其与边界地区的流量交换,概化为通用水头边界。

### 2.2 水文地质参数

根据水文地质基础资料 and 前人研究成果及经验,将含水层渗透系数分为多个区。根据各个分区内的水文地质概况,给各个分区的水平渗透系数、弹性释水系数等分别赋予适当的初始值<sup>[3,5]</sup>。

### 2.3 模型校核

模型校核是地下水数值模拟中重要的环节,通过不断改变渗透系数、释水系数等水文地质参数,重复计算,直到观测点计算结果与观察结果的差控制在可以接受的范围内。由于实际地质条件比较复杂,为了达到研究目的,建立模型时必然要提取主要影响因素,弱化甚至忽略部分次要因素,因此可能导致模型参数和实际地质参数不一样,这是理论研究允许的,但是模型参数应规范在一定的范围内,其变化趋势和实际地质参数应一致<sup>[6]</sup>。建立模型经过模型校核后,8 个观测井中观测值和水头计算值偏差在 1 m 以内的观测点有 7 个,占总数的 87.5%,最大偏差率为 2.1%,拟合效果较好。观测孔水位拟合见图 1。由图 1 可知,水流模型与观测孔所得到的地下水动力特征基本吻合,说明该水流模型具有较高的精密度。

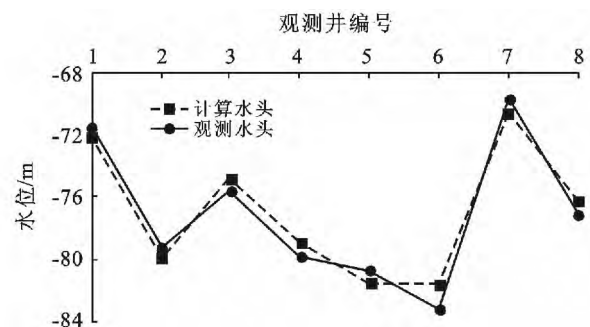


图 1 观测井水位拟合图

模型校正后,弹性释水系数取 0.000 6~0.000 8,水平渗透系数根据不同分区取值为 1~16,均为有效合理范围,且参数分区及递变规律基本符合实际水文地质情况,开采用水较为分散,利用 Recharge 模块将其以面状补排形式给出,入渗速率为-0.000 014。

## 3 运移模拟

### 3.1 数学模型的建立

描述三维非稳定地下水流系统中  $k$  组分污染物的存在时间和运移的偏微分方程为:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (1)$$

式中: $\theta$ ——介质孔隙度(无量纲);  $C^k$ —— $k$  组分的溶解浓度( $Bq/m^3$ );  $t$ ——时间(d);  $D_{ij}$ ——水动力弥散系数张量( $m^2/d$ );  $x_i, x_j$ ——沿直角坐标系轴向的距离(m);  $v_i$ ——渗流或线性孔隙水流速( $m/d$ ),它与单宽流量存在如下关系: $v_i = q_i/\theta$ ;  $q_s$ ——单位体积含水层流量,它代表源(正值)和汇(负值)( $1/d$ );  $C_s^k$ ——源或汇水流中  $k$  组分的浓度( $Bq/m^3$ );  $\sum R_n$ ——化学反应项( $Bq/(m^3 \cdot d)$ )。

$$C(x, y, z, t) = c_0(x, y, z, t) \quad (\text{在 } \Omega \text{ 上}) \quad (2)$$

式中: $C(x, y, z, t)$ ——溶质的浓度分布;  $c_0(x, y, z, t)$ ——已知的浓度分布;  $\Omega$ ——整个模型区域。

溶质运移模型以第 2 节所得的水流数值模拟模型为基础,同时考虑模拟单元溶质浓度是随时间变化的,所以模型建立为平面二维非稳定流模型,无垂向模拟。 $Cl^-$  作为示踪离子,其本身性质稳定,不易发生化学变化,较难被吸附,很难被微生物分解,在  $Cl^-$  运移过程中的对流与弥散起主要作用,不考虑  $Cl^-$  在含水层中的吸附、生物降解等作用,因此式(1)偏微分方程中略去化学反应项。

### 3.2 参数的确定

研究对象选取人工回灌地下水水质控制中的基本

控制项目中的氯化物( $Cl^-$ )。由于目标层为第 IV 承压含水层,采用井灌的方式将处理后的雨水回灌给目标层。将该注水井作为一个  $Cl^-$  迁移的点源,点源外的  $Cl^-$  浓度为  $220.68 \text{ mg/L}$ <sup>[7-8]</sup>。模拟过程中秉承污染最大化、危害最大化的原则,取天津市  $Cl^-$  浓度的平均最高值  $27.88 \text{ mg/L}$  和该值的 2 倍(即  $55.76 \text{ mg/L}$ )作为入渗初始质量浓度<sup>[4]</sup>,以确定可能出现的最大危害情况<sup>[9]</sup>。根据相关研究,孔隙度取 0.30,纵向弥散度和横向弥散度分区取 40 和  $8 \text{ m}$ <sup>[10-11]</sup>。

为了研究回灌水量对地下水水质的影响,分别取回灌水量为 100 和  $400 \text{ m}^3/d$ 。研究区地下水流场模型是用 2011 年的钻孔资料校核的,校核后的模型参数可直接用于溶质运移模拟<sup>[7]</sup>。

### 3.3 模拟结果与分析

在  $Cl^-$  运移模型中,分别按以下条件模拟溶质运移情况,假设在 3 000 d 的时间内, $Cl^-$  以该质量浓度持续补给地下水。

(1) 回灌雨水的  $Cl^-$  质量浓度为  $27.88 \text{ mg/L}$ ,回灌水量为  $100 \text{ m}^3/d$ 。3 000 d 后的地下水中  $Cl^-$  质量浓度分布情况见图 2a。

(2) 保持回灌溶质浓度不变,回灌水量为  $400 \text{ m}^3/d$ 。模拟后地下水中  $Cl^-$  质量浓度分布情况见图 2b。

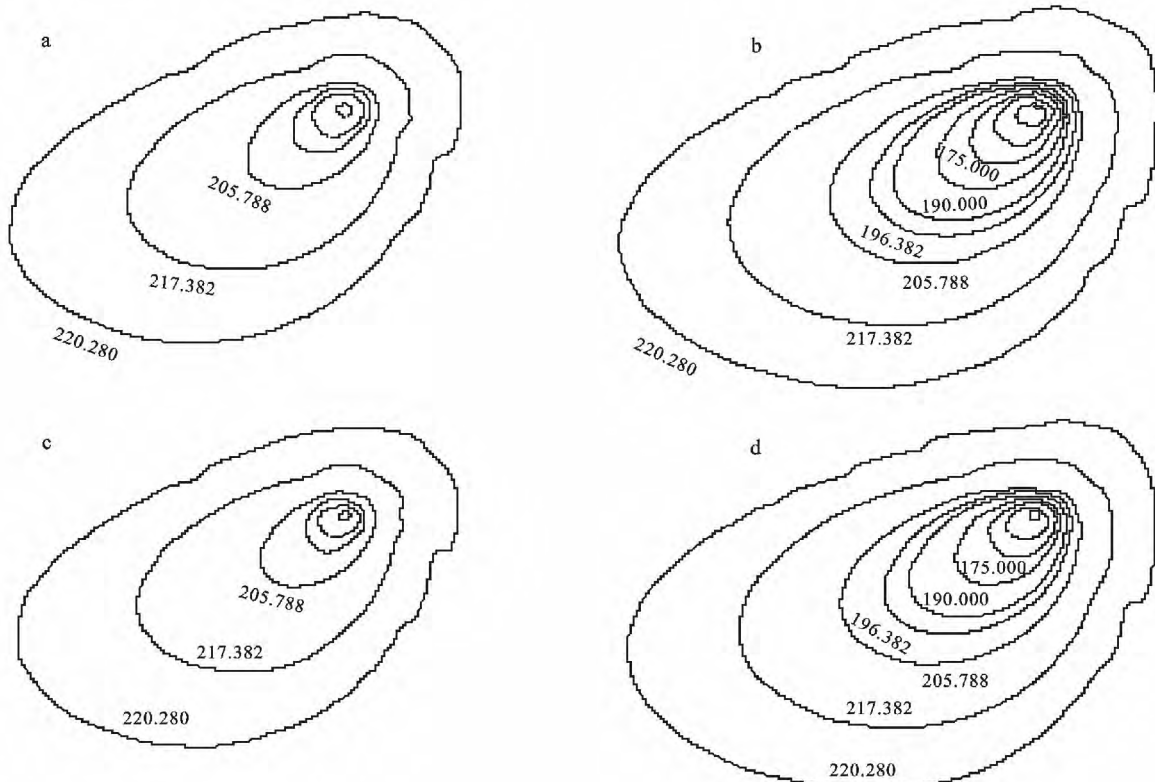


图 2 3 000 d 后回灌井周围地下水中  $Cl^-$  质量浓度等值线

(3) 回灌雨水的  $\text{Cl}^-$  质量浓度为 55.76 mg/L, 回灌水量为  $100 \text{ m}^3/\text{d}$ , 3 000 d 后的地下水中  $\text{Cl}^-$  质量浓度分布情况见图 2c。

(4) 保持回灌溶质浓度不变, 回灌水量变为为  $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 。模拟后地下水中  $\text{Cl}^-$  质量浓度等值线见图 2d。

回灌井以外的  $\text{Cl}^-$  浓度背景值为 220.68 mg/L。由图 2 可知回灌区  $\text{Cl}^-$  浓度随着距离回灌井距离的减小而减小, 说明该回灌雨水对第 IV 含水组的氯化物浓度具有稀释作用, 有利于改善原地下水水质。

已知回灌井西南方向(即回灌井的左下角方向)水头较低, 地下水中  $\text{Cl}^-$  污染羽在回灌井的西南方向分布较广, 说明通过深井回灌的雨水主要向地下渗流场中水头较低的方向运动。由于导水系数、水力坡度等较小, 回灌雨水运动速度较慢, 扩散范围较小, 回灌水中的  $\text{Cl}^-$  在该深层注水井中 3 000 d 后大约迁移了 570~630 m, 这与 Li 等<sup>[12]</sup>在澳大利亚佩思设计的储水层恢复系统(ASR)的研究结论类似。

3 000 d 后等  $\text{Cl}^-$  质量浓度为 220.280 mg/L 时, 情况 1, 2, 3, 4 中回灌水影响面积分别为: 305 000, 437 500, 280 000 和 405 000  $\text{m}^2$ 。当溶质质量浓度相同时, 回灌水量增大 4 倍, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大大约 1.44 倍; 当回灌水量相同时, 溶质质量浓度增大 2 倍时, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大大约 0.92 倍。说明回灌水量增大有助于回灌水在地下水中的迁移扩散, 当回灌水溶质浓度增大时, 由于回灌水中  $\text{Cl}^-$  浓度与原地下水中  $\text{Cl}^-$  浓度的差值减小了,  $\text{Cl}^-$  浓度差的减小抑制了其地下水中的弥散作用。回灌水溶质质量浓度和回灌水量对  $\text{Cl}^-$  在地下水中的迁移均有一定的影响, 其中, 回灌水量的影响大于溶质质量浓度的影响。

## 4 结论

(1) 回灌区  $\text{Cl}^-$  浓度随着距离回灌井距离的减小而减小, 说明利用雨水回灌地下水不仅可以从水量上补充地下水, 而且可以稀释天津地下水中的氯化物浓度, 利于改善原地下水水质。

(2) 在 3 000 d 的模拟期内, 通过深井回灌的雨水主要向地下渗流场中水头较低的方向运动, 由于导水系数、水力坡度等较小, 回灌雨水运动速度较慢, 污染羽最远处距回灌井约 570~630 m, 扩散范围较小。低  $\text{Cl}^-$  浓度主要分布在回灌井附近, 220.280 mg/L 等浓度线覆盖约 437 500  $\text{m}^2$ , 217.382 mg/L 等浓度线覆盖大约 227 500  $\text{m}^2$ , 占 220.280 mg/L 等浓度线区域的 52.00%; 205.788 mg/L 等浓度线覆盖大约 115 000  $\text{m}^2$ , 占 220.280 mg/L 等浓度线区域的 26.29%。

(3) 回灌水溶质质量浓度和回灌水量对  $\text{Cl}^-$  在承压含水层中的迁移均有一定的影响, 其中, 当溶质质量浓度相同时, 回灌水量增大 4 倍, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大大约 1.44 倍; 当回灌水量相同时, 溶质质量浓度增大 2 倍时, 等  $\text{Cl}^-$  浓度面积增大大约 0.92 倍, 可见回灌水量的影响大于溶质质量浓度的影响。增大回灌水量、减小回灌水溶质浓度利于  $\text{Cl}^-$  的迁移扩散。

(4) 在回灌井附近的污染羽中,  $\text{Cl}^-$  随回灌水在地下含水层迁移扩散, 随着雨水回灌的持续进行,  $\text{Cl}^-$  影响范围越来越大, 考虑到回灌水中其他污染物的影响, 选择回灌地点时应避开以地下水为水源的区域。

(5) 由于目标含水层补给条件和渗透性较差, 虽然地下水对回灌雨水有稀释作用, 但作用非常缓慢, 为防止回灌水污染地下水, 应该进一步根据水文地质情况的不同制定更加严格的回灌水质标准。

## [参 考 文 献]

- [1] 张宗文. 某污染场地地下水流及污染物运移数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [2] 吴昌将. 基于 VisualModflow 的呼和浩特地下水硝酸盐污染数值模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2010.
- [3] 王亚斌, 张海涛, 郭淑娟, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价(天津)成果报告[R]. 天津: 天津市地质调查研究院, 2007.
- [4] 张娜, 赵乐军, 李铁龙, 等. 天津城区道路雨水径流水质监测及污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2127-2131.
- [5] 吴铁钧, 孙文承. 天津市地质环境图集[M]. 天津: 天津市地质矿产局, 2004.
- [6] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] Zheng C, 贝内特, 晋玉, 等. 地下水污染物迁移模拟[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] 赵维明, 王家兵, 丁雍, 等. 天津市地质环境检测报告[R]. 天津市地质环境监测总站, 2004.
- [9] 宁立波, 董少刚, 马传明. 地下水数值模拟的理论与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
- [10] 吴晓艳, 熊正为, 彭小勇, 等. 降雨对铀尾矿库地下水中核素迁移影响的模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2013(1): 23-27.
- [11] 高光耀, 冯绍元, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的溶质径向运移动力学模型及半解析解[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(2): 156-163.
- [12] Li Q, Harris B, Aydogan C, et al. Feasibility of recharging reclaimed wastewater to the coastal aquifers of Perth, Western Australia[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2006, 84(4): 237-246.