

抽出处理措施的有效性评价

——某碳酸盐岩含水层中地下水有机污染及其去除研究之三

宋汉周¹, Allan D. Woodbury²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 曼尼托巴大学工程学院, 加拿大 R3T 2N2)

摘要 应用经过拟合的模型,对实例中实施的抽出处理措施的有效性作了数值模拟分析.结果表明,在模拟时段内场址区碳酸盐岩含水层中 TCE 污染羽状体的分布范围及其浓度均有比较明显的减小,去污效率比较理想.已由抽水试验证实,其有利因素之一就是污染含水层介质具有较强的水力传导性.鉴于系统的不确定性,应对抽出处理方案进行多阶段设计.

关键词 碳酸盐岩含水层;TCE 污染;抽出处理措施;有效性评价

中图分类号:P64;X131.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2000)04-0067-05

近年来对于地下水去除污染的研究越来越引起人们的重视,因为它与资源和环境的保护问题密切相关.迄今为止,提出了旨在加速污染物稀释作用的生物降解(biodegradation)以及抽出处理(pump-and-treat,简称PAT)等措施^[1,2].生物降解措施具有对地质环境扰动小并且安全及经济等优点而引起了人们的兴趣,但由于很难确定去污系统的相关系数,因而有关研究进展目前仍限于室内阶段^[3].因此,目前应用的最普遍的去污措施仍是抽出处理(包括抽出处理回灌)措施.例如在美国,对上百个污染场址区地下水采取抽出处理的约占75%^[4].然而,实践证明这种去污方案的实施并非总是有效的,它受到了多方面因素的影响,因而仍有必要进行探讨.

本文在已有工作的基础上^[5,6],应用数值法对场址区碳酸盐岩含水层中地下水受三氯乙烯(简称TCE)有机污染采取的抽出处理措施作出评价.其主要目的有二:一是判定上述去污措施应用于本实例是否有效;二是确定影响抽出处理措施有效性的最主要因素.

1 抽出处理方案的设计及实施

自从1991年10月场址区碳酸盐岩含水层TCE一类有机物(包括TCA——三氯甲烷)被检出以来,对场址区地下水尤其是污染含水层中地下水加强了监测,较大密度的取样点及定期的取样分析进一步圈定了含水层中TCE污染物羽状体的分布范围,从而为去污方案的设计和和实施提供了必不可少的基础资料.

整个抽出处理方案的设计如下:首先由位于污染羽状体内的3口抽水井(E1~E3)将污染地下水抽出,之后采用曝气法(air-stripping)将抽出的污染地下水加以处理,最后把经过去污处理的地下水输入地表排水系统并最终排入红河(Red River).

上述抽出处理方案的实施始于1994年11月.场址区3口抽水井的分布位置如图1所示.E1和E2抽水井用竖轴式水轮机泵进行抽水,而E3则用

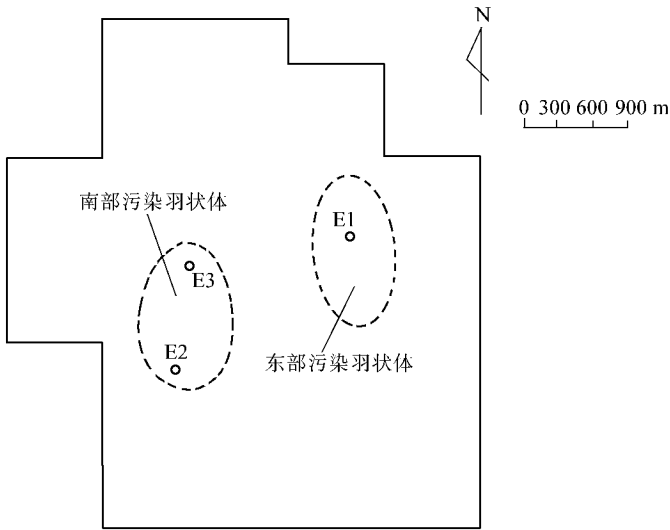


图 1 去污方案中 3 口井的分布

Fig.1 Location of three extraction wells at site

淹没式泵抽水.为防止曝气塔内填料中产生水垢,对抽出的地下水作了必要的预处理,即用分离剂(sequestering agent)使水流通过曝气塔时水溶液中的各种盐类物质不致沉淀.曝气塔内的填料旨在缓冲进入塔内的水流并使气-液相之间的接触强化.整个抽出处理系统的运行处于自动控制状态,因而可昼夜不停地工作.

表1为场址区抽出处理措施两年间的实测抽水量统计.同设计值相比较,各井实测值有一定的变化,此源于E1井的出水能力小于设计值,因而作了相应的调整.即为了保持3口井的抽水量与设计值接近,E2,E3井的抽水量分别增加了约17%和63%.

另外需要说明的是,由于春季融雪,于1995年3月初至4月中旬约有6周时间,水泵停止抽水,因此该去污系统运行的时间约为该年度的90%.同样由于气候原因,该去污系统在第二年度内亦有数周时间停止了工作.

2 抽出处理措施的有效性

这里,主要应用经过拟合的模型对上述抽出处理措施的有效性进行数值评价.该模型假定场址区流场是稳定的,而污染溶质运移则是非稳定的.地下水位监测资料反映出由抽水形成的测压水位降落漏斗很快达到稳定,因此表明对于流场流态的假定是符合实际的.此外,该模型还假定场址区碳酸盐岩含水层的污染是由两个点状污染源的入渗造成的.但在模拟过程中,则以由各观测孔水质监测资料圈定的TCE污染羽状体经过线性插值后作为初始浓度来替代其背景浓度.有关抽水井位于模拟之初的TCE污染物浓度见表2.

部分模拟结果见图2.该图反映出,在3口抽水井持续工作的条件下场址区碳酸盐岩含水层中TCE污染物浓度呈显著降低的趋势.此表明,上述抽出处理方案的实施是有效的.

去污措施条件下含水层中TCE污染羽状体分布范围的变化从另一个侧面可以反映出实施上述方案的有效性程度.这里根据Betcher等^①定义的最大允许浓度($50\text{ }\mu\text{g/L}$)等值线圈定了该污染羽状体的侧向分布范围,其依时性变化如图3所示.该图反映出,TCE污染羽状体分布面积随着持续的抽出处理措施的进行而呈明显缩小的趋势,如在这之前该污染羽状体面积超过 10 km^2 ,而在持续了三年的抽出处理措施之后该污染面积已小于 1 km^2 .据此,可以确定上述抽出处理措施的去污效率 RE (remediation efficiency):

$$RE = \frac{S_0 - S_i}{S_0} = \frac{10.35 - 0.76}{10.35} = 92.66\%$$

式中 S_0 、 S_i 分别为TCE污染羽状体于实施去污措施前、后的分布面积, km^2 .计算结果表明,抽出处理措施于本实例中的应用是成功的,去污效率亦比较理想.

3 现有抽出处理方案的修正及其有效性

在原设计的地下水去污方案中,视如下参数为常量:抽水量、抽水井位及抽水井数等.虽然地下水流在某些情形下具有似稳定态的特征,但含水层中的溶质运移是不可能达到稳定态的.这意味着在抽出处理方案实施的不同阶段需要考虑有关设计参数的合适与否,必要时应作调整.另一方面,随着抽出处理系统的持续运行,积累的监测资料将越来越多,从而使原去污方案的重新设计成为可能.很明显,方案中的抽水井数量是一个重要的参数.

现有的去污方案中设计了3口抽水井,在抽水之初这3口井均位于TCE污染羽状体内,但E2井则相对位于其边缘部位.此由这3口井位之间于初始时刻的浓度差异得以佐证,即E2井位的浓度低于其它两个井位的,如表2所示.在实施了抽水处理措施一年之后,E2井位更接近于污染羽状体的边缘部位(图2(b));两年之后该井位则位于该污染羽状体之外(图2(c)).显然,从地下水去污的角度而言,E2井的排污效率要低于

表1 E1~E3井抽水量统计			
Table 1 Pumping rates for wells E1~E3 L/s			
抽水井	设计 抽水量	实际抽水量	
		1994年11月~ 1995年10月	1995年11月~ 1996年10月
E1	31.5	27.1	27.5
E2	18.9	22.2	22.2
E3	6.3	10.3	11.3

表2 模拟之初有关井位TCE浓度统计			
Table 2 Initial concentration of TCE at wells $\mu\text{g/L}$			
抽水井	E1	E2	E3
TCE浓度	340.7597	228.1254	1017.8032

① Betcher R C,Grove G,Pupp C. Groundwater in Manitoba Hydrogeology, quality concern management.

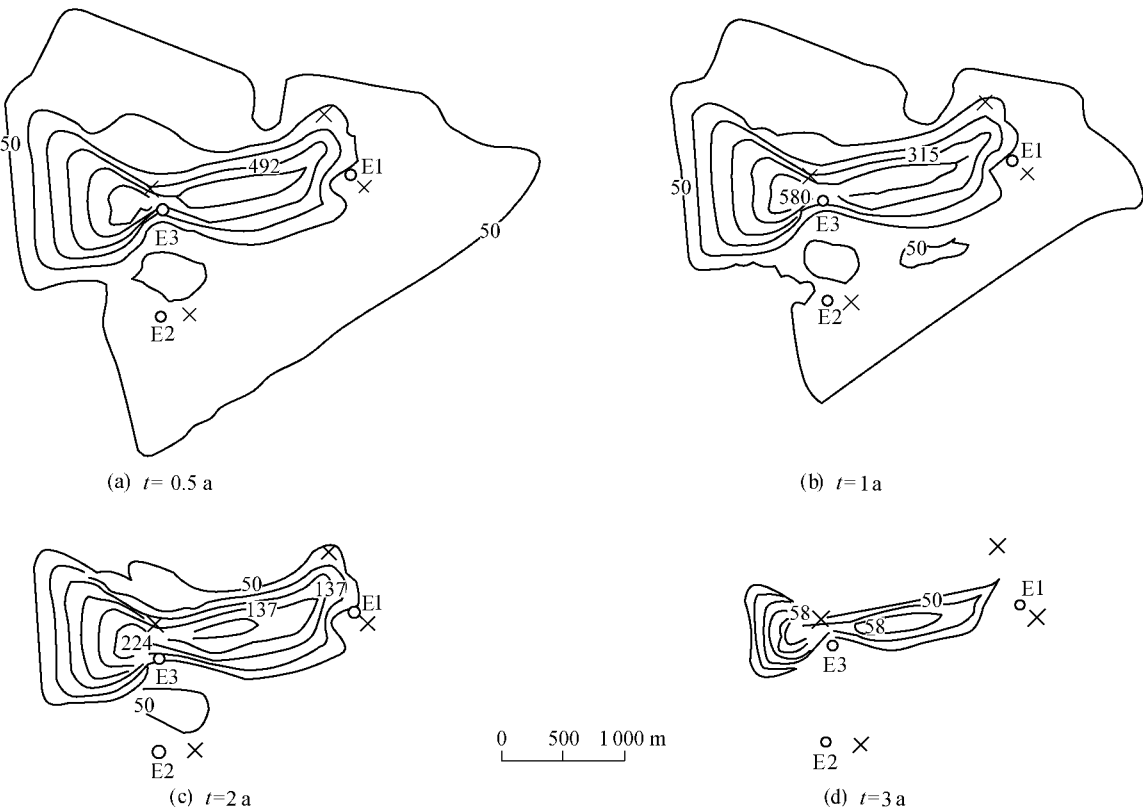


图 2 持续抽水条件下含水层中 TCE 污染物于不同时刻的浓度分布
Fig.2 Plume of TCE contaminant under pump-and-treat at different time

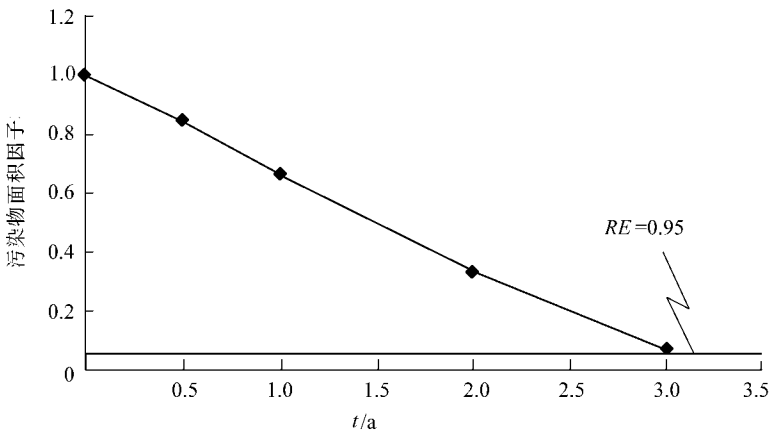


图 3 抽出处理条件下 TCE 污染羽状体面积的依时性变化
Fig.3 Variation of area of TCE plume with time under extraction

E1 及 E3 抽水井的. 这样可根据抽水井的实际位置和污染羽状体的分布位置,对抽水井数量进行调整. 应用已经过拟合的模型^[6]将抽水井由 3 口减至 2 口(即 E1、E3 井抽水,但 E2 井停止工作),其它参数保持不变,进行数值模拟,其流场特征如图 4 所示,而含水层中 TCE 污染浓度于不同时期的分布如图 5 所示. 该图反映出新的去污方案中尽管抽水井数量减少了,但含水层中 TCE 污染羽状体的分布范围及其浓度仍有明显减小的趋势. 由此可见,经过修正的去污方案的实施仍是有效的. 从某种意义上而言,新的去污方案比原先的更加经济有效. 这是因为新方案中仅保留了相对接近于污染源位置的 E1、E3 井的工作,而终止了位于污染羽状体边缘部位的单位体积排污量比较少的 E2 井的工作.

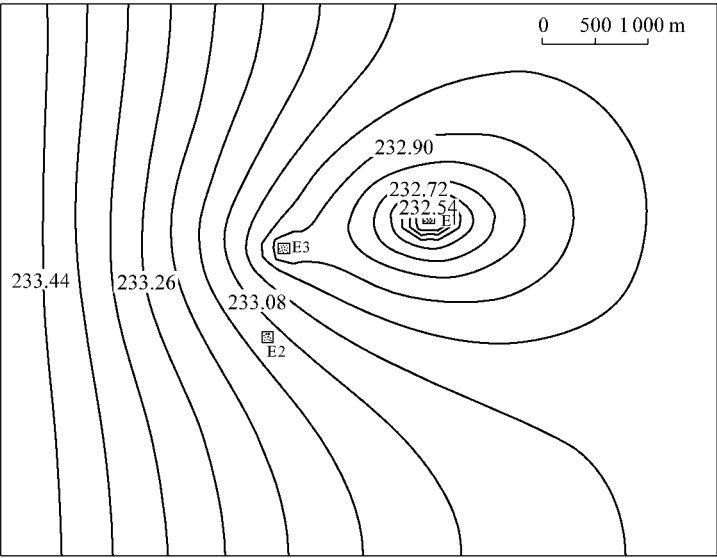


图 4 两口井抽水条件下的流场特征

Fig.4 Flow field under two wells' extraction at site

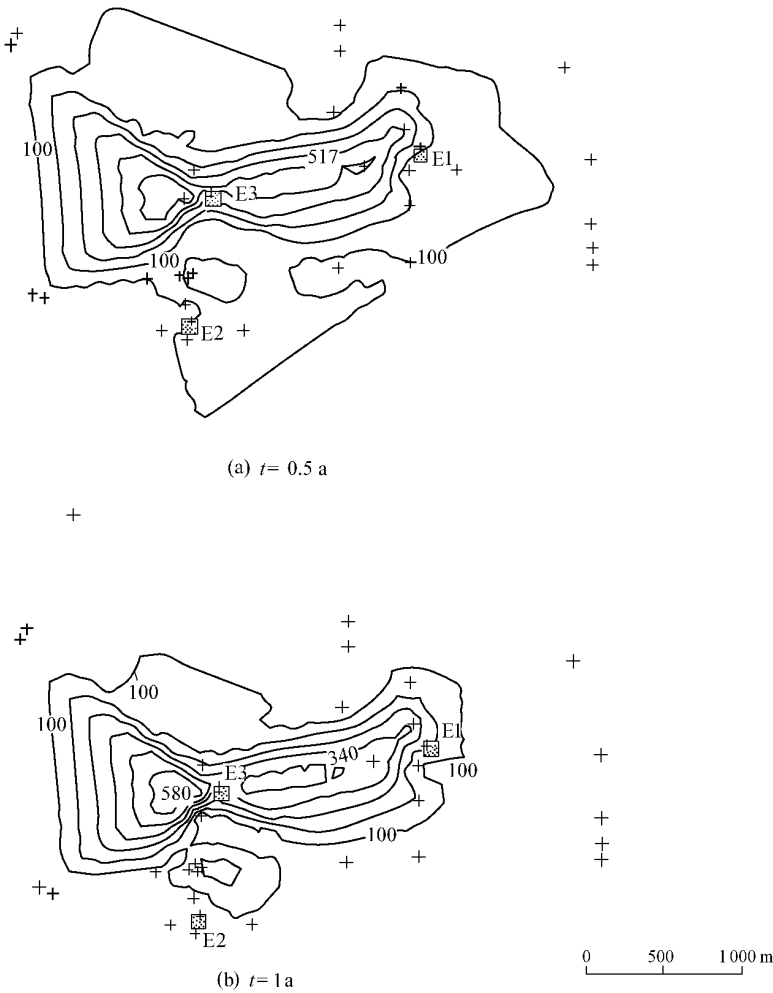


图 5 两口井抽水条件下的 TCE 浓度分布

Fig.5 Plume of TCE contaminant under two wells' extraction at different time

上述对于现有抽水处理方案的修正及其数值模拟结果表明,对于诸如抽出处理一类地下水去污方案的多阶段设计是有必要的.

4 结 语

a. 本文实例采用了近年来普遍使用的一种地下水去污方案——抽出处理措施. 在该方案中, 首先由 3 口抽水井将场址区碳酸盐岩含水层中的 TCE 污染地下水抽出, 然后送入曝气塔进行去污处理, 最后将去污后的地下水排入地表水系. 应用经过拟合的模型进行数值模拟, 结果表明上述抽出处理方案的实施是有效的, 去污效率(RE)比较理想. 连续地实施了长达 3 年的地下水去污方案之后, RE 值达 92.66%.

b. 抽出处理方案于本实例中的应用之所以有效, 主要是因为场址区碳酸盐岩含水层介质具有较强的水力传导性. 场址区抽水试验结果表明, 该污染含水层的导水系数在 $11\,980 \sim 18\,860\text{ m}^2/\text{d}$ 之间. 可见, 污染含水层的较强的水力传导性是一个有利于地下水去污方案的实施并期望有效的重要因素.

c. 本文对实例中的原有地下水去污方案作了修正, 数值模拟结果表明新的地下水去污方案依然有效. 可见, 对诸如抽出处理一类地下水去污方案应进行多阶段设计. 随着去污方案的实施及监测资料的积累, 系统的不确定性将逐渐暴露. 据此, 可对原有的设计方案进行修正, 包括对原有监测网的修正, 从而可望新的设计方案趋于更合理、经济和有效.

致谢: 本论文系列是笔者作为访问学者期间与第二作者合作的部分研究成果, 曾得到了国家留学基金的资助. 此外, 感谢 Manitoba 大学土木及地质工程系提供了计算设施及部分软件, 还感谢 UMA Engineering Ltd. 及 Bristol Aerospace Ltd. 提供了有关资料.

参考文献:

- [1] Nancy A L, McCarty PL. Column studies on methanotrophic degradation of TCE and 1,2-dichloroethane[J]. Groundwater, 1990, 28(6): 910 ~ 919.
- [2] Mackay D M, Cherry T A. Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation[J]. Environment Science and Technology, 1989, 23(6): 630 ~ 636.
- [3] Sun A K, Hong J, Wood T K. Modeling TCE degradation by a recombinant pseudomonad expressing toluene ortho-monooxygenase in a fixed-film bioreactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1998, 59(1): 40 ~ 50.
- [4] Macdonald J A. Restoring contaminated groundwater: An achievable goal? [J]. Environment Science and Technology, 1994, 28(8): 362A ~ 368A.
- [5] 宋汉周, Woodbury Allan D. TCE 的物理化学特性及其生物降解作用——某碳酸盐岩含水层中地下水有机污染及其去除研究之一[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 52 ~ 56.
- [6] 宋汉周, Woodbury Allan D. TCE 运移的计算机模拟——某碳酸盐岩含水层中地下水有机污染及其去除研究之二[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(3): 14 ~ 20.

Study of Groundwater Contamination in a Carbonate Aquifer and Remediation

3. Performance Assessment of Pump-and-Treat Measures

SONG Han-zhou¹, Allan D. Woodbury²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Faculty of Engineering, University of Manitoba, Canada R3T 2N2)

Abstract: By use of the calibrated model, the performance of pump-and-treat measures at site is assessed on the basis of numerical simulation. The results indicate that there is a net reduction both in concentration of TCE contaminant and in the extent of TCE plume during operation. Therefore, remediation efficiency(RE) is ideal. One important favourable factor is the high transmissivity of the aquifer, according to the pumping test at site. It appears that high permeability of the media, combined with relative homogeneity, is suitable for groundwater remediation. Finally, it is suggested that a multi-stage design be conducted, considering the system uncertainties.

Key words: carbonate aquifer; TCE contamination; pump-and-treat remediation; performance assessment