

A Simulation Research about the Natural Adsorption of U in the Immersion Liquid of *In-Situ* Leaching Uranium Depositions Based on GMS

Kaiguang Hu, Lei Zhang, Zhi He, Pandong Yang

School of Nuclear Resource Engineering, University of South China, Hengyang Hunan
Email: hukaiguang2008@163.com

Received: May 12th, 2017; accepted: May 24th, 2017; published: May 27th, 2017

Abstract

To study the move and degradation of uranium in residual immersion liquid after the retirement of *in-situ* leaching uranium deposits, underground water stimulating software GMS is adopted to establish underground water models. By running these models, the water head distribution curve of a certain uranium deposit is simulated by the model of the groundwater in a certain area. Based on the groundwater model and the water head distribution of the groundwater after the leaching of uranium, the model of groundwater and groundwater migration in the retired uranium mine was established by MT3DMS. MT3DMS model was run to get the result of Uranium Migration under different adsorption conditions. The results of simulation show that the sorption of aquifer can decrease the concentration of uranium and the distance of migration in groundwater.

Keywords

Groundwater Pollution, Numerical Model, Uranium, GMS

基于GMS某地浸铀矿地浸液中铀的吸附模拟

胡凯光, 张磊, 何智, 杨盘东

南华大学核资源工程学院, 湖南 衡阳
Email: hukaiguang2008@163.com

收稿日期: 2017年5月12日; 录用日期: 2017年5月24日; 发布日期: 2017年5月27日

摘要

为了研究地浸铀矿退役后残留在地下中的地浸液中铀的迁移情况, 采用地下水模拟软件GMS建立某地浸

铀矿退役后的地下水模型。通过某地浸铀矿地下水模型,模拟出某地浸铀矿在退役后水头分布。以地下水模型和某地浸铀矿退役后水头分布为基础,通过MT3DMS建立退役铀矿地下水铀运移模型。运行MT3DMS模型,得出在不同吸附条件下地下水中铀运移结果。对模拟的结果进行分析表明,提高含水层岩土吸附性可以降低地下水中铀浓度和迁移距离。

关键词

地下水污染, 数值模拟, 铀, GMS

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地浸采铀是一种非常规矿石的开采方法[1],与常规开采方法相比较,地浸采铀具有投资少,生产效率高,对环境污染少等优点[2]。同国外地浸技术比较,我国地浸采铀技术起步较晚,但是发展极为迅速。目前地浸采铀已成为我国铀矿开采的重要方法之一,与常规开采相比较,地浸采铀具有其优越性。但是随着地浸铀矿开采退役后,在含矿含水层中残存一定铀浓度的地浸液,将会对采区地下水产生污染。为了研究残存的地浸液中铀的运移和降解规律,采用地下水溶质运移模拟软件 GMS10.0 [3]对某退役地浸铀矿地下水中残存铀进行数值模拟,分析地浸液中铀的运移规律。同时分析地浸液与矿石发生的化学反应,通过溶质运移软件模拟出地浸液中铀在自然条件下的降解规律,得出其中的化学反应对地浸液中铀的迁移产生的影响。

2. 采区概况

某地浸铀山位于我国西北部,属于疏松砂岩型铀矿床,经过一定时间开采后,目前已经处于退役状态。

2.1. 采区水文地质条件

根据地层地质条件,某铀矿含矿含水层自上而下划分为三层。第 I 层为潜水含水层。在潜水含水层中主要是砂岩、细砂岩,泥质胶结,较疏松,透水性良好,其厚度变化较稳定。第 II 层为含矿含水层以粗粒砂岩、中粒砂岩为主,含有少量中细砂岩,泥质胶结,疏松,透水性强。顶板主要是由泥岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩构成,顶板平均厚度大约 6 m,底板分布不稳定,主要为含泥夹层,且较破碎。第 III 层含水层层岩性以中粒砂岩为主,泥质胶结,疏松,透水性较强。第 III 层含矿含水层顶板主要是以含泥夹层为主,与第 II 层底板岩性相同,节理较发育,顶板厚度约为 3 m,起伏变化不大,较平缓。底板是以泥岩层为主,隔水性较强。

2.2. 采区水文地质参数

地浸溶液主要是位于第 II 含矿含水层,其主要水文地质参数包括渗透系数、含矿含水层释水系数、弥散度以及孔隙度,弥散度是用来描述空隙介质弥散系数的一个重要参数,对于弥散度的计算和取值,当今学者做了广泛而深入的研究,李国敏[4]和 Reh [5]分析了多个水质模型的弥散度与尺寸效应的关系,得出不同模型尺寸效应的分维计算。通过分维计算,得出纵向弥散度,再由纵向弥散度和横向弥散度的比值得出横向弥散度,其中,纵向弥散度是表征地浸液中铀在纵向的含水层中弥散特征的重要参数,横向弥散度是表征地浸液中铀在横向的含水层中弥散特征的重要参数,其具体参数见表 1。

2.3. 地浸采区地下水监测参数

根据采区的抽注井的分布,收集了其中某一年中的部分水位。其主要数据见表 2。

2.4. 地浸采区模拟场的初始浓度条件

根据所调查的地浸铀矿的数据,监测地下水中元素含量,由此看出,退役后的地浸铀矿地下水中所含有的元素主要有钙、镁、铝、钠、钾、铀等元素,具体数据见表 3。

3. 反应运移模型

退役铀矿的地下水修复治理是地浸铀矿退役环境治理的一个重要核心环节。通过监测地下水中污染物浓度,采用地下水数值模拟软件 GMS 模拟出残存铀离子在地浸后的运移变化趋势,以及铀参与的化学运移对铀离子浓度的衰减所产生的影响。

对于饱和和多孔介质的三维多组分运移模拟的方法有多种,徐海珍等[6]采用 PHT3D 对酸性地下水进行了模拟,并取得了一定的效果。Davis 等[7]采用 PHREEQ 对地浸铀矿的地下水进行了模拟,分析了地球化学对水质的影响。本次模拟采用 GMS 软件中的 MT3DMS 模块,MT3DMS 是模拟地下水中单项溶解组分对流、弥散、源汇和化学反应的三维溶质运移模型。其中,化学反应主要包括一些简单的单组分反应,包括平衡或非平衡状态的线性或非线性吸附作用、一阶不可逆反应和可逆的动态反应[8]。本次模拟采用对流-扩散-化学反应方程来模拟地下水中溶质运移。其中涉及的化学反应包括:化合物氧化水溶液中的铀;铀酰离子与硫酸根离子和硫酸氢根离子形成硫酸铀酰离子;酸法浸出液与围岩中的杂质发生反应。

4. 数学模型

针对退役铀矿的地质条件,忽略含矿含水层中的离子交换,将模型概化为二维水动力流场和三维溶

Table 1. Hydrogeological parameters table of simulated area

表 1. 模拟区域水文地质参数表

渗透系数(m/d)		弥散度		孔隙度	水力梯度
水平渗透系数	垂直渗透系数	纵向弥散度	横向弥散度		
6.2	0.00005	2.5	0.55	0.2	0.008

Table 2. Monitoring table of water level (m)

表 2. 水位监测表(米)

监测日期	k-1	k-2	k-3	k-4	k-5
3月5日	457	455	449	453	447
6月11日	450	450	451	461	450
9月7日	453	453	450	460	451
12月23日	447	460	457	445	455

Table 3. The initial condition of the simulated area

表 3. 模拟区的初始条件

元素	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Na ⁺	K ⁺	U ²⁺	HCO ₃ ⁻	U ²⁺
浓度(mg/L)	49	382.9	37	74.6	3.98	72.5	100	20

质运移模型。在达西定律和质量守恒基础上，得到地下水运动基本微分方程[9]：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

式中， k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为x、y、z方向的渗流系数； h 为水头； w 为源汇项， S_s 为储水系数。

初始条件：

$$H(x, y, z, t) = H_o(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega$$

$H(x, y, z, t)$ 为某一已知函数； Ω 为渗透区域。

边界条件：

$$H(x, y, z) = H_o(x, y, z) \quad (x, y, z) \in S$$

S 为三维区域的边界曲面

对于单组分的污染物在地下水系统中的迁移，考虑铀的吸附和放射性衰变，其控制方程描述为：

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

θ 为地下水介质的孔隙度，无量纲； C^k 为物质 k 的溶解度， ML^{-3} ； t 为时间； x_i 、 y_j 分别为沿着x、y坐标轴的距离，L； D_{ij} 为水动力弥散系数张量， L^2T^{-1} ； v_i 为渗流或线性孔隙水流速度， LT^{-1} ，它与单位流量或达西流量 q_i 有关，为单位体积含水层源和汇的体积流量， T^{-1} ； C^k 为源汇流中物质 k 的浓度， ML^{-3} ； $\sum R_n$ 为化学反应项目， ML^{-1} 。

5. 模型的建立与参数选取

根据退役铀矿的地质条件，采用GMS软件建立MODFLOW模型，其中模型范围为 1000×1000 m，根据采区钻孔分布情况，划分为 100×100 的网格，同时根据地质条件和含水层分布，在垂直方向划分为三层。故总计网格数目为30,000。得出模型的三维立体模型，如图1所示。

其中第I层参数选取，水平渗透系数为9.3，垂直渗透系数为1.5，纵向弥散度为6，横向弥散度为0.5，孔隙度为0.4。第II含水层参数选取，水平渗透系数为6.2，垂直渗透系数0.00005，纵向弥散度为2.5，横向弥散度为0.55，孔隙度为0.3。第III层参数，水平渗透系数为5.2，垂直渗透系数0.00005，纵向弥散度为2，横向弥散度为0.45，孔隙度为0.3。

6. 模拟结果以及分析

首先，通过GMS软件建立MODFLOW模型，运行MODFLOW模型，得出初始水头值，其结果如图2所示。

(一) 通过GMS软件中的MODFLOW运行结果，建立了MT3DMS模型。其中，根据井场投产年限和生产资料，得出井场区域的铀浓度，为20 mg/L，为了更好的得到模拟结果，在模型运移的时间步长上，设置为5年，其总时间为20年。分别运行出退役铀矿1、5、10、15、20年中，铀的迁移和浓度的降解其铀等浓度曲线分布图如图3所示。

在铀浓度分布曲线中可以看出，随着时间推移，铀离子将逐渐向地下水下游迁移。分别在井场周围的4个点位(A、B、C、D)得出铀浓度数据结果，其中A、B、C、D是井场周围点位，A、B为井场上游点位，C、D是井场周围低水位点，其结果如图4所示。

从上图可以看出, 随着时间推移, 井场周围的铀浓度会逐渐升高, 离井场越远, 其浓度提升越缓慢, 最后达到稳定值, 但是低于退役井场初始浓度。在低水位的监测点 D 处, 存在一定的铀浓度值, 其铀浓度远远低于低水头。这说明, 铀的迁移主要受到地下水流场的影响, 同时也表明, 在溶质运移过程中也受到弥散作用的影响, 这与现在实际监测具有一致性。

(二) 考虑自然降解中存在的化学反应对铀迁移的模拟结果, 通过 GMS 软件中的 MODFLOW 运行结果, 建立了 MT3DMS 模型, 在 MT3DMS 模型中, 设置了化学反应参数, 根据线性等温吸附[10]设置 1st sorption constant 参数为 0.003。rate const (dissolved)为 0.0001 其中, rate cons (sorbed)为 0.0001。根据井场投产年限和生产资料, 得出井场区域的铀浓度为 60 mg/L, 为了更好的得到模拟结果, 在模型运移的时间步长上, 设置为 5 年, 其总时间为 20 年。运行出模型结果, 得出退役铀矿在历时 20 年中铀的迁移和分

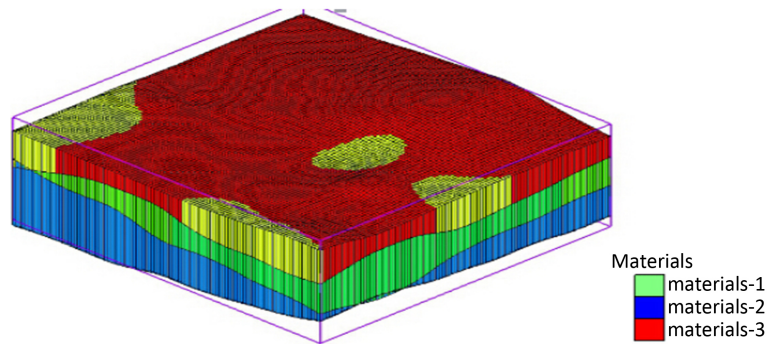


Figure 1. Three-dimensional map of simulated area
图 1. 模拟区域三维立体图

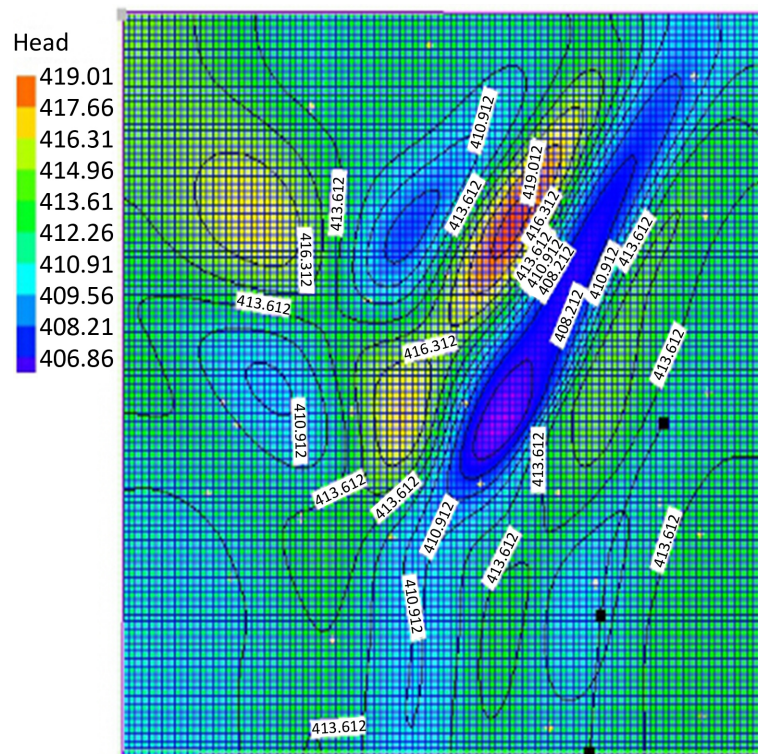


Figure 2. The initial head of the simulated area
图 2. 模拟区域初始水头值

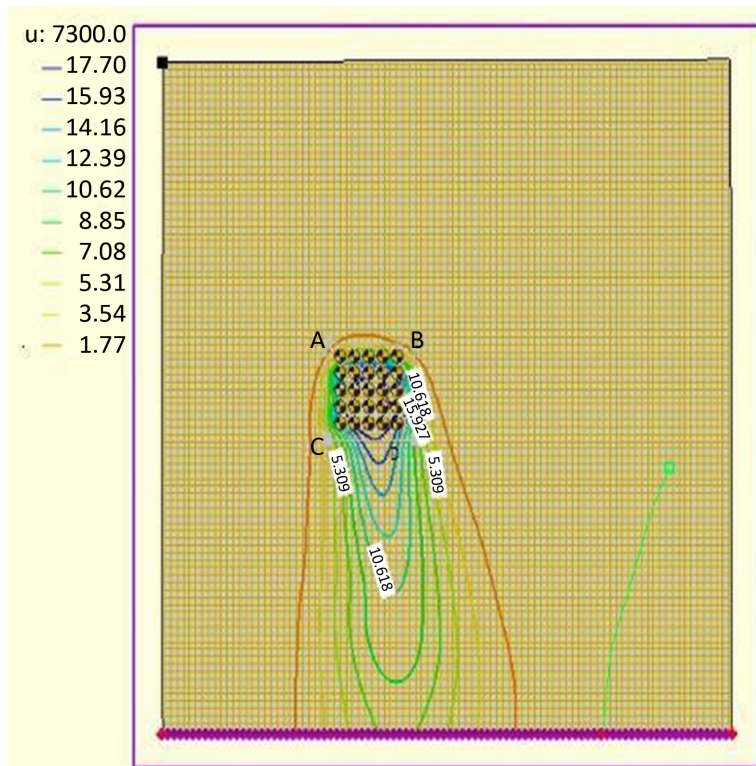


Figure 3. Simulation of uranium concentration curve after 20 years
 图 3. 模拟 20 年后铀等浓度曲线

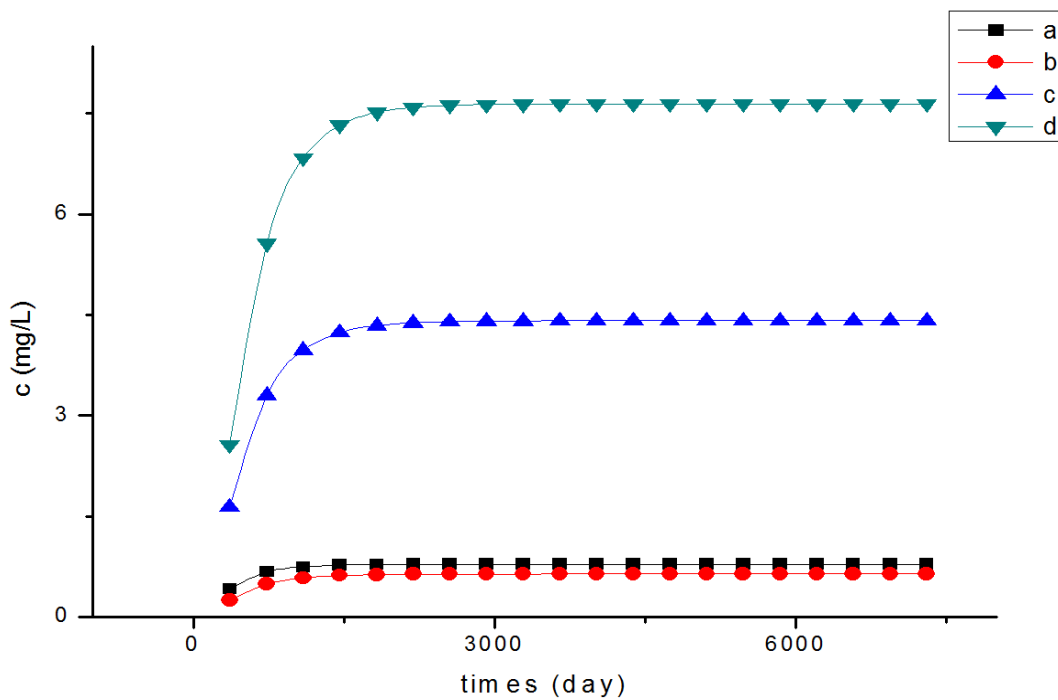


Figure 4. Penetration curve of the uranium concentration at the monitoring point
 图 4. 监测点的铀浓度穿透曲线

布结果，如图 5 所示。

从模型运行 20 年结果分析，铀的迁移主要是从高水头往低水头迁移，铀浓度降解主要是受到水流场的影响。在铀迁移过程中，地下水的流场对铀浓度降低起到了主要作用。

分别在井场周围 a、b、c、d 四个点位得出铀浓度数据结果，其中 a、b、c、d 是井场周围点位，a、b 为井场上游点位，c、d 是井场周围低水位点，其结果如图 6 所示。

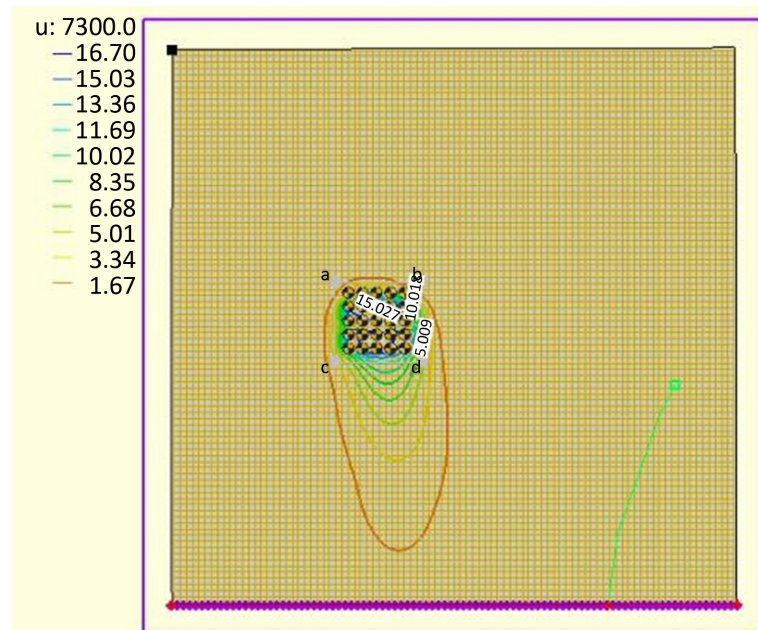


Figure 5. Degradation profile of uranium migration and concentration
图 5. 铀迁移和浓度降解分布图

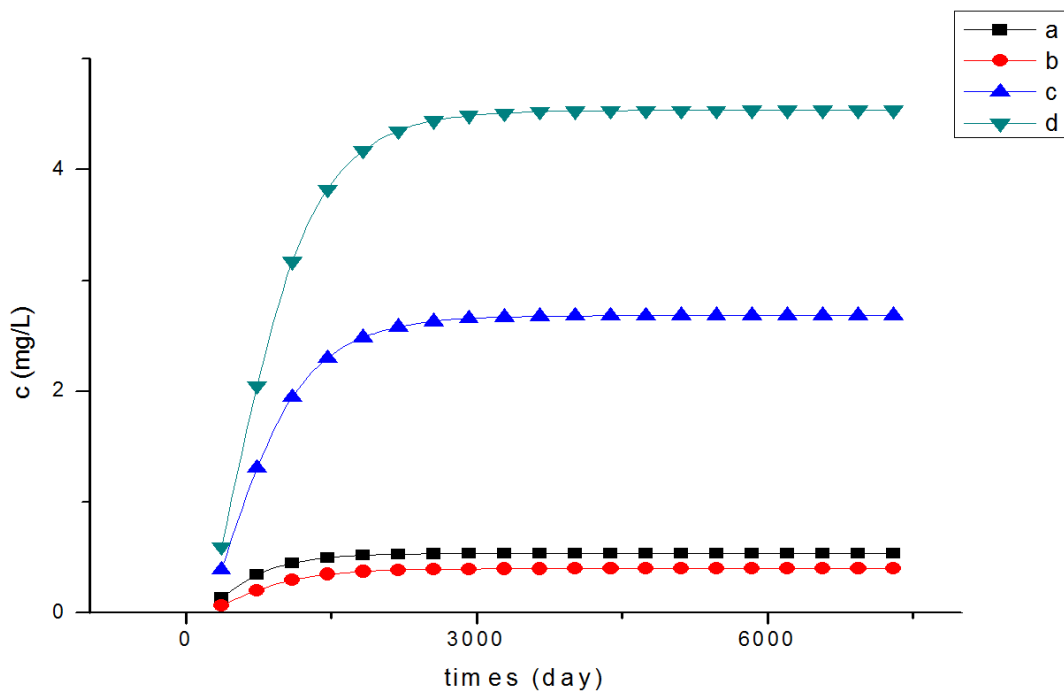


Figure 6. Penetration curve of monitoring the uranium concentration
图 6. 监测点铀浓度穿透曲线

通过地下水模拟软件 GMS 运行的结果分析,铀在地下水中的迁移和降解,主要受到地下水流场的影响,地下水对铀的净化作用有较明显的效果。对比分析两个模型模拟的结果,在 A(a)、B(b)、C(c)、D(d) 四个点位的浓度存在明显的降低,这表明铀在运移和吸附过程中,存在一定的浓度降低,而且迁移范围也会变小。但是在高水头处 A(a)铀的浓度降解不是特别明显。这说明在高水头处降解不多,主要原因是在 A(a)高水头处铀的浓度较低,这样就减少了反应的有效成分,在地下水中,溶质铀的吸附主要受到水动力的影响,其中,含矿含水层中的吸附作用不是特别明显,铀的浓度并没有存在明显的降低。总体分析,化学反应在地浸铀矿退役后,对地下水中铀的吸附有一定的效果。其次,在自然条件下,铀的降解是极缓慢的,通过吸附可以处理地下水中一定浓度的铀。

7. 结论

通过调查退役铀矿采区地层中残存的地浸液,分析残存地浸液的主要成分,采用地下水模拟软件 GMS,模拟出 1、5、10、15、20 年中,某地浸矿区地下水中残存的铀的迁移和降解。其中,模型一未涉及岩土对地下水中铀的吸附条件下模拟了铀的迁移。模型二在涉及岩土对铀的吸附条件下,模拟了铀的迁移和降解,分别模拟出监测点的铀浓度随时间变化。通过对比分析模拟结果得出以下结论。

其一,地下水中铀运移主要受到地下水动力和弥散作用的影响,其中以地下水动力作用影响最大,模拟结果显示特征是地下水铀从高水头区域向低水头区域运移。弥散作用对地下水中铀运移影响主要体现在部分地下水中铀从低水头区域向高水头区域运移,但运移距离较短。

其二,岩土吸附对地下水中铀运移范围和运移距离有明显影响。当吸附参数为 0.003 时,模拟 20 后结果显示,四个监测点中铀浓度普遍降低,其中 A、B 监测点浓度降低幅度最大。这表明地下水中铀浓度受岩土吸附作用较明显。在等浓度曲线图 5 中,地下水中铀运移并未到达河流中。与等浓度曲线图 3 对比,发现铀运移范围变小且浓度降低。

在实际工作中处理地下水中铀污染范围可以采用提高岩土对铀的吸附性以此控制铀的迁移范围,为实际的铀矿地下水污染提供指导性意见,同时可以通过往采区注入有效试剂,增大吸附参数,可以有效的控制污染范围。

基金项目

国家自然科学基金(11275092); 湖南省自然科学基金(2015JJ2129)。

参考文献 (References)

- [1] 曹霖, 李建华, 廖文胜, 等. 流体控制剂在地浸采铀中的应用[J]. 湿法冶金, 2015, 34(2): 132-133.
- [2] 阙为民, 王海峰, 田时丰, 等. 我国地浸采铀研究现状与发展[J]. 铀矿冶, 2005, 24(3): 113-117.
- [3] Jin, M.G., Luo, W.Y., Liu, Y.F. and Sun, R.L. (2009) Modeling of Groundwater Flow Using GMS in Zhengzhou Plain, China.
- [4] 王礼恒, 李国敏, 董艳辉. 裂隙介质水流与溶质运移数值模拟研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 84-85.
- [5] Yeh, W.W. (1986) Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem. *Water Resources Research*, **22**, 95-108. <https://doi.org/10.1029/WR022i002p00095>
- [6] 徐海珍, 高艳丽, 李国敏. 地下水中酸性污染羽的自然净化作用数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 928-929.
- [7] Davis, J.A. and Curtis, G.P. (2007) Consideration of Geochemical Issues in Groundwater Restoration at Uranium In-Situ Leach Mining Facilities. U.S. Geological Survey, NUREC/GR-6870, Washington DC.
- [8] Ma, R., Liu, C.X., Greskowiak, J., et al. (2014) Influence of Calcite on Uranium (VI) Reactive Transport in the Groundwater-River Mixing Zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, **156**, 27-37.

<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.10.002>

[9] 喻佳, 汪家权, 徐凤. 某电厂项目地下水污染物运移模拟[J]. 广东化工, 2014, 41(4): 66-67.

[10] 周文波, 龚正军. 线性和非线性估计等温吸附和动力学参数比较[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(3): 5-8.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: me@hanspub.org