

GMS 在某生活垃圾填埋场地下水溶质运移数值模拟中的应用

孟立志

黑龙江省生态地质调查研究院 黑龙江 哈尔滨 150030

【摘要】：根据某生活垃圾填埋场水文地质条件建立了概念模型，应用 GMS 软件中的 MODFLOW 模块模拟地下水流场，再利用 MT3DMS 模块模拟典型污染因子的运移转化规律，从而达到污染预测的目的。应用过程及模拟结果表明 GMS 具有操作简便、三维可视效果好、前后处理能力强等突出优点，可以对生活垃圾填埋场地下水污染进行准确直观的预测。

【关键词】：GMS 某；水溶质运移；数值模拟

1 GMS 简介

GMS (Groundwater Modeling System) 是美国 Brigham Young University 的环境模型研究实验室和美国军队排水工程试验工作站联合开发的地下水数值模拟软件，该软件除包含 MODFLOW、FEMWATER、MT3DMS、RT3D、SEAM3D、MODPATH、SEEP2D、NUFT 等主要计算模块外，还包含 PEST、UCODE、MAP、Borehole、TINs、Solid 等辅助模块，是迄今为止功能最齐全的地下水模拟软件之一，它具有良好的使用界面，强大的前处理、后处理功能及优良的三维可视效果^[1]。

2 某生活垃圾填埋场概况

2.1 自然地理概况

该生活垃圾填埋场处理规模为 20t/d，占地面积 34920 m²，占规划总面积的 64.2%，总库容 24.72 万 m³，有效库容 21.30 万 m³。所处地貌为岗阜状高原。属中温带大陆性季风气候区，其特点是：冬季多受西伯利亚寒流影响，寒冷干燥且漫长；夏季受海洋暖气团影响，温热湿而短促。年平均气温 -0.7℃，10℃ 以上活动积温为 2050~2150℃，无霜期 100~110 天，全年冻结期约在 150~200 天左右，冻层深 1.5~2.5 米。年降水量 500~600 毫米，全年日照时数为 2661 小时，降水年内分布不均匀，夏季 6~8 月占全年降水量的 60%~70%，春末夏初即 5~6 月降水量只占全年的 10%~15%。

2.2 地质条件概况

填埋场小兴安岭-松嫩地块隆起带的北端，在晚印支花岗岩中，零星分布古生代晚期的地层，并有少部分上侏罗统和下白垩统覆盖，岩性主要为火山岩、火山碎屑岩。市区西部为松嫩中隆起的东北隆起区，在早白垩世晚期，与整个松嫩盆地一起沉降，并逐步扩展，晚白垩世中期发展到鼎盛阶段，湖水向东部漫出断陷范围，湖盆边缘大致位于今日市区东部边界一带，因此，上白垩统嫩江组广泛分布，该组是一套以泥岩为主夹细碎屑岩的深湖-半深湖相沉积，厚度从湖盆边缘到中心逐渐增厚。由于晚燕山运动影响，嫩江组沉积的松嫩盆地开始萎缩，本区相对隆起抬升，缺失沉积。市区东部为伊春-延寿地槽褶皱系茂林-木兰地槽褶皱带的乌底河中、新断陷的西南部，沉积有新近系孙吴组，该组岩性主要为河流相杂色砂砾岩。第四纪，本区地壳以差异性升降为特点，早更新世后东部小兴安岭抬升，处于剥蚀阶段，西部松嫩平原相对下沉，普遍沉积上更新统哈尔滨组黄土状粉质粘土。晚更新世末期至全新世，本区相对上升，由于河流侵蚀堆积作用，在现代河谷沉积了上更新统顾乡屯组及全新统砂砾石、粉质粘土。

2.3 水文地质条件概况

区域上地下水可划分为六个类型：即第四系黄土状粉质粘土微裂隙孔隙潜水、第四系 (Q) 砂砾石孔隙潜水、新近系砂砾岩 (N_{2s}) 孔隙潜水、白垩系碎屑岩类 (K_{2n}) 裂隙微承压水、白垩系碎屑岩类 (K_{2n}) 裂隙孔隙承压水、基岩风化带网状裂隙水。

填埋场所处地下水类型为白垩系碎屑岩类孔隙裂隙承压水 (K_{2n})，含水层由白垩系嫩江组砂岩、砂砾岩组成，顶底板都有泥岩隔水层，具有承压性。含水层厚度不均匀，但富水性较好。承压水头埋深 2~12m，隔水顶板 (上覆泥岩层及粉质粘土层) 埋深 18m。单井涌水量 100~500m³/d，渗透系数在 0.50~1.45m/d 之间。碎屑岩类孔隙裂隙承压水矿化度 300~700mg/L，pH 值为 5.56~7.59。地下水水化学类型以 HCO₃-Ca (重碳酸钙) 型及 HCO₃. Cl-Ca (重碳酸氯化钙) 型为主，个别点为 HCO₃-Na (重碳酸钠)。按酸碱度 PH 值分类为弱酸性-中性水，按固形物含量分类为淡水。耗氧有机物含量低-中等。

填埋场的白垩系承压含水层由于上部的泥岩起到了良好的隔水作用，但同时也阻碍了大气降水入渗补给。填埋场含水层主要接受侧向径流补给。经测算，白垩系碎屑岩类孔隙裂隙承压水径流方向：由东北向西南径流，与正东西向成 15° 夹角。排泄以侧向径流和人工开采为主要排泄方式。

白垩系嫩江组裂隙孔隙承压水季节变化不明显，水位动态曲线平缓。填埋场地下水埋深 2~12m。地下水枯水期出现在 4~5 月份，至 5 月中旬水位降到最低，水位埋深为 3.8~19.2m；以后随着上游大气降水的增加水位并不上升，6~7 月份表现为缓慢波动，8 月份大气降水量最大，水位于 8 月中下旬开始缓慢上升，9 月末至 10 月初开始下降，直到翌年 4~5 月份降至枯水期最低水位，填埋场地下水水位存在一定的滞后效应。

3 地下水流数值模拟

3.1 水文地质概念模型

3.1.1 含水层概化

预测模型的模拟区范围同调查评价范围。根据其地质、水文地质条件，模拟区地下水含水层为白垩系碎屑岩类孔隙裂隙承压水含水层，厚 5.0m。含水层的岩性和厚度在区内变化程度较小，故将其概化为均质等厚各向同性承压含水层。

3.1.2 水力特征概化

在模拟区内，白垩系碎屑岩类孔隙裂隙承压水含水层水力梯度约为 0.143%，地下水流场起伏较大。地下水流速约为 0.08m/d，渗流基本符合达西定律；含水层的上部与下部均覆盖较厚的泥岩层，透水性

较差, 水流形式可以概化为三维流。根据《长水河农场生活垃圾填埋场工程可行性研究报告》测算, 本填埋场渗滤液产出量为 16.75m³/d, 产量较小, 在发生渗漏时不会对地下水水流场及水力特征产生影响。水流各要素随时间发生变化, 为非稳定流。

3.1.3 边界条件概化

模拟区含水层与模拟区外含水层存在水量交换, 因此将含水层边界概化为透水边界。根据模拟区现在的地下水水流场特征, 将侧向边界概化为第一类边界, 即定水头边界。垂向边界上, 含水层上覆 18m 隔水层, 其岩性以泥岩为主, 根据《水文地质手册(第二版)》(地质出版社 2012 年), 泥岩渗透系数为 $2 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$, 透水性较弱, 因此不考虑降水入渗补给量, 将含水层顶部该处为隔水边界。含水层底部为较厚的泥岩, 透水性较差, 因此含水层下部边界概化为隔水边界^[2]。

3.2 地下水数学模型

模拟区地下水运动的数学模型可概化为均质、各向同性的二维承压水非稳定流模型^[3], 其数学模型为:

$$\begin{cases} K \frac{\partial}{\partial x} \left[(B_1 - B_2) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + K \frac{\partial}{\partial y} \left[(B_1 - B_2) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q_r - Q_i = \mu^* \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y) \in D, t \geq 0 \\ h(x, y, t)|_{t=0} = h_0(x, y) & (x, y) \in D \\ h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) & (x, y) \in D, t > 0 \end{cases}$$

式中:

K — 含水层渗透系数 (m/d);

μ^* — 承压含水层弹性释水系数;

h — 承压水水位 (m);

B_1 — 含水层顶板标高 (m);

B_2 — 含水层底板标高 (m);

Q_r — 入渗补给强度 (m/d);

Q_i — 排泄强度 (m/d);

h_0 — 初始水位 (m);

h_1 — 研究区一类边界点的水位 (m);

x 、 y — 坐标 (m);

D — 模拟区范围;

Γ_1 — 模拟区一类边界。

上述偏微分方程、初始条件和一类边界条件共同组成定解问题。

3.3 空间时间离散离散

模拟区的空间离散采用矩形网格剖分法, 共剖分为 1338 个单元格, 每个单元格实际面积为 0.01675km²。模拟时以一个月为一个应力期, 一个月为一个时间步长。

3.4 初始流场及源汇项处理

本次模拟采用实际调查的流场作为初始流场。模拟区地下水的补给侧向径流补给。由于含水层埋深大, 上覆隔水层厚, 故不考虑大气降水入渗补给, 并忽略蒸发排泄。排泄方式主要以侧向径流排泄为主。模拟时, 以现状条件下地下水的平均补给量和排泄量作为源汇项, 运行后, 地下水水位在短期内变化特点与近些年来相近时, 认为模型能够表达模拟区的水文地质条件。

3.5 模型的校验

模型的校验是确定模型中各个参数的过程。模型运行 1 年后, 地下水位变化不大, 水头计算值与地下水的实测值的等值线在整体上达到了很好的拟合, 说明所建立模型是正确合理的, 能够正确地反映模拟区的水文地质条件。

4 地下水溶质运移模拟

地下水溶质运移模拟采用 GMS 软件中的 MT3D 模块, 在流场的模拟基础上, 直接建立地下水溶质运移模型, 将所建的溶质运移模型用于模拟区溶质运移预测。

污染运移模型的参数获取主要结合模拟区水文地质条件特征, 根据国内外经验参数, 对污染物运移参数进行了选取。从保守预测模拟考虑, 忽略土壤吸附、降解和化学反应等过程。

4.1 模拟因子

根据垃圾渗滤液中污染物的种类, 本次模拟选择的模拟因子为 CODmn 和 NH₃-N。

4.2 水质运移数学模型

地下水非稳定流溶质运移的可混溶对流-弥散数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(nC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C^k}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C^k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C^k}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C^k}{\partial y} \right) \\ \quad - \frac{\partial}{\partial x} (m u_x C^k) - \frac{\partial}{\partial y} (m u_y C^k) + q_s C_s^k & t > 0 \\ C^k(x, y, t)|_{t=0} = c_0^k(x, y) & x, y \in \Omega \\ C^k(x, y, t) = c^k(x, y, t) & x, y \in \Gamma_1, t \geq 0 \end{cases}$$

式中:

n — 含水层有效孔隙度;

C^k — 模拟溶质 k 的溶解浓度, ML⁻³;

t — 时间, d;

x , y — 坐标, L;

D — 水动力弥散系数张量, L²T⁻¹;

u — 地下水实际流速, LT⁻¹;

q_s — 外源溶液的单位体积流速, T⁻¹;

C_s^k — 外源溶液中 k 组分的浓度, ML⁻³;

C^k — 已知浓度, ML⁻³;

Ω — 计算区域;

Γ_1 — 浓度边界。

4.3 源强分析

由于填埋场设有较好的渗滤液防渗系统,正常运行时并不会对地下水水质造成严重影响。因此,本次模拟仅针对防渗系统失效的非正常状况。根据项目可研及一般工程经验推算,渗滤液产生量为 $16.75\text{m}^3/\text{d}$,浓度:CODmn 浓度 $15000\text{mg}/\text{l}$; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 $1000\text{mg}/\text{l}$ 。

4.4 源强分析

预测泄漏发生100d、1000d、8年(服务期限)、30年后。

4.5 地下水污染预测

4.5.1 工况1 预测

假设在服务期内,垃圾渗滤液以恒定浓度连续注入含水层中,CODmn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度分别取 $15000\text{mg}/\text{L}$ 、 $1000\text{mg}/\text{L}$,渗滤量为 $0.16\text{m}^3/\text{d}$ 。

模拟结果显示:服务期内,地下水中污染因子浓度随建厂时间增加而增大,污染晕范围由场区内扩散至厂区外。服务期满后即停止排放污染因子,此时,地下水中各污染因子的浓度逐渐降低,污染晕中心沿地下水径流方向发生运移。服务期满后4年后,污染晕中心距离填埋场中心约 1000m ,污染晕向下游扩散至场区边界附近,此时填埋场里的污染物已经得以净化,CODmn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最大可达 $2100\text{mg}/\text{L}$ 、 $190\text{mg}/\text{L}$ 。服务期满后14年,污染晕中心距填埋场中心约 1300m ,地下水中污染因子浓度进一步降低,CODmn 浓度小于 $1900\text{mg}/\text{L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度小于 $150\text{mg}/\text{L}$ 。

4.5.2 工况2 预测

假设淋滤液瞬间全部进入含水层中,造成含水层中各污染因子浓

度瞬时达到最大值。CODmn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度分别取 $15000\text{mg}/\text{L}$ 、 $1000\text{mg}/\text{L}$ 。

模拟结果显示:泄漏发生100d后,污染晕以填埋场所在区为中心,扩散至周边 200m 范围内,地下水中污染因子浓度较高。泄漏发生1000d后,地下水中污染因子浓度明显变低,污染晕沿地下水径流方向,向填埋场西侧运移,污染晕中心距厂址中心约 250m 。泄漏发生16年后,地下水中污染因子浓度大幅度降低,污染晕范围有所扩大,污染晕中心距厂址中心约 750m 。泄漏发生20年后,地下水中污染因子浓度大幅度降低,污染晕范围进一步扩大,污染晕中心距厂址中心约 1000m 。泄漏发生30年后,污染晕范围相对较大,污染晕中心距厂址中心约 1350m ,此时地下水中污染因子浓度:CODmn 浓度小于 $850\text{mg}/\text{L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度小于 $55\text{mg}/\text{L}$ 。

5 结语

与同类其他应用软件相比,GMS 软件在地下水数值模拟的应用中有较强优势,模块多、功能全、使用范围广,且可以采用概念化方式建立水文地质概念模型,使该过程更直观,操作更方便。其中的MODFLOW 模块用户界面较同类其他软件的用户界面更友好、更合理,其前、后处理功能也更强,故在地下水模拟领域值得推广使用该软件。但在实际应用过程中,尤其是在建立概念模型、处理源汇项数据、对地层标高进行插值时需特别注意一些典型问题,以避免出现不合理乃至错误的模拟结果^[4]。

参考文献:

- [1] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质,2003,30(5):53-55.
- [2] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报,2003(3):33-36.
- [3] 杜超. 肖长来. 王益良. GMS 在双城城市区地下水资源评价中的应用[J]. 水文地质工程地质,2009(6):32-33.
- [4] 陈冬琴. GMS 软件在杭嘉湖地下水资源评价中的应用[J]. 产品开发与应用,2007(5):49-50.