

利用地下水数学模型确定电厂灰场库容

杨川¹, 王金生²

(1. 北京市自来水集团, 北京 100031; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

[摘要] 建立一维包气带溶质运移数学模型和二维潜水层溶质运移数学模型, 对热电厂灰水污染物在包气带和潜水中的运移进行模拟, 以下游水源地污染物浓度峰值不超过环境质量标准为依据, 通过模型反复计算, 得到包气带模型运行时长, 即最大灰水排放时间, 继而得到灰场库容。该方法可以为电厂灰场库容设计提供合理的标准, 从而控制由于灰水排放所造成的潜水层污染问题。

[关键词] 热电厂灰水; 数学模型; GMS 软件

[中图分类号] P641.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1004-1184(2006)06-0037-05

Capacity Determination of Ash Field in Power Factory by Groundwater Mathematical Model

YANG Chuan¹, WANG Jinsheng²

(1. Monitoring Center of Water Quality from Running Water Group in Beijing, Beijing 100031, 2. Institute of water science, Beijing Normal University, Beijing, 100875)

Abstract: Building the transportation methamodel of one-dimensional aeration zone and two-dimensional saturated-zone mass transport mathematical models to simulating transport of ash water pollutants from power plant. Based on concentration peak of pollutants in water source of the lower reaches no more than environment quality standards, more calculations by the model, got operational time long of unsaturated-zone, namely the largest time of ash water discharge, and then achieved ash field capacity. The methods can supply reasonable design standards for ash field storage to control water-pollution problems as a result of ash water discharge.

Keyword: ash water from power plant, Mathematical models and GMS software

电厂燃煤会产生大量的粉煤灰, 粉煤灰贮存方式包括湿法贮灰和干法贮灰, 我国粉煤灰的贮存方式以湿法贮灰为主, 湿法贮灰是管道水力输送出炉粉煤灰至贮灰场堆放的一种运行方式^[1]。目前, 湿法贮灰场的设计主要考虑贮灰坝坝体稳定性、排水设施以及灰水收集等方面, 对于贮灰场库容设计考虑较少, 没有合理的设计标准, 多数电厂为满足排灰需要, 会在原有已贮满灰场的顶部继续加建多级子坝, 随意扩大灰场库容。灰水中超标的项目有 pH 值、悬浮物、氟化物和砷等重金属, 若长期下渗进入地下水, 会对地下水造成污染, 使下游水源地水质恶化, 只有制定合理的灰场库容才能控制灰水对地下水的污染, 使下游地下水水源可以满足饮用要求。本文以北方某热电厂为

例, 从地下水环境保护的角度出发, 利用地下水数学模型确定热电厂灰场合理库容, 从而为电厂灰场库容的设计提供了可借鉴的方法。

1 研究方法

以灰场下游饮用水源地污染物浓度不超过环境质量标准为依据, 利用包气带与潜水层溶质运移模型对灰水中污染物的运移进行模拟, 通过计算得到包气带模型运行时长, 即灰场最大灰水排放时间, 继而得到灰场合理库容。具体步骤为: ① 给定一个包气带模型模拟时段数以及时间步长, 进行包气带溶质运移模拟, 得到污染物在不同时刻运移到潜水面的浓度, 作为源强代入潜水层溶质运移模型; ② 利用潜水层模型

[收稿日期] 2006-05-15

[作者简介] 杨川(1979-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主攻方向: 水环境模拟。

计算污染物运移到下游水源地的浓度峰值,若浓度峰值大于环境质量标准,减少包气带模型的时段数,然后重复上述运算,否则,增大包气带模型时段数,通过反复计算,得到浓度峰值正好不超过环境质量标准情况下的包气带模型时段数,与相应时间步长的乘积为最大排灰时间;③灰水排放时间与灰水排放速率以及灰水比的乘积即为灰场合理库容。

1.1 包气带溶质运移模拟

灰水污染物在土壤中的运移可用一维包气带溶质运移模型来描述。包气带溶质运移模型中的流速数据一般通过土壤水分模型计算来获得,由于灰场灰水单位时间排放量基本保持不变,灰水下渗一段时间后,灰场底层土壤的含水量基本达到稳定状态且垂向上变化不大,可以把灰水下渗实际流速概化为单位时间下渗量与底层土壤平均含水量的比值。

稳态水流状况下,考虑线性等温吸附的一维包气带溶质运移模型为:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho}{n} K_d$$

式中: C —污染物浓度(mg/l); D —纵向弥散系数(m^2/d); v —断面平均流速(m/d); R_d —阻滞因子,反映土壤对污染物的吸附状况; K_d —分配系数(ml/g); ρ —土壤容重(g/ml); n —有效空隙度。

污染物在入渗带中的垂向迁移问题,可用典型迁移模型——无限长砂柱中连续释放污染源的情况来求解析解^[2],连续释放污染源情况下(污染源浓度为 C_0),溶质运移模型的定解条件为:

$$C(x, 0) = 0$$

$$C(0, t) = C_0$$

$$C(\infty, t) = 0$$

在稳态水流情况下,结合所给限制条件,利用 Laplace 变换方法求出考虑线性吸附的一维溶质运移模型在 Laplace 空间的解析解,模型的解析解^[3]为:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x - vt/R_d}{2 \sqrt{Dt/R_d}} \right] + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{x + vt/R_d}{2 \sqrt{Dt/R_d}} \right] \right\}$$

1.2 潜水层溶质运移模拟

灰水下渗通过包气带进入潜水层,可对潜水造成污染,本文建立潜水层水流模型和溶质运移模型对灰水中污染物在潜水层中的运移进行计算。由于模拟区域面积相对较大,潜水可以不考虑在垂直方向上的运

动,仅考虑水平方向上的运动,故建立水平方向上的二维潜水层模型对溶质运移进行计算。

二维潜水层水流模型为:

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q$$

式中: H —潜水水头(m); K_x, K_y — x, y 方向上的渗透系数(m/d); μ —给水度; Q —源汇项(m^3/d)。

相应的定解条件为:

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y) \quad x, y \in \Omega$$

$$H(x, y, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, t) \quad x, y \in \Gamma_1$$

$$K_n \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q \quad x, y \in \Gamma_2$$

式中: H_0 —潜水初始水头值(m); H_1 —第一类边界水头值(m); q —第二类边界流量值($m^3/d \cdot m$),流入为正,流出为负; K_n —第二类边界法线方向渗透系数(m/d); Ω —模拟区域; Γ_1 —第一类边界; Γ_2 —第二类边界; n —边界法线方向。

潜水层溶质运移模型为:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + W$$

式中: C —污染物浓度; D_x, D_y — x, y 方向上的弥散系数; v_x, v_y — x, y 方向上的平均流速; R_d —阻滞因子; W —溶质源汇项。

相应的初始边界条件为:

$$C(x, y, 0) = C_0(x, y) \quad x, y \in \Omega$$

$$C(x, y, t) |_{\Gamma_1} = C_1(x, y, t) \quad x, y \in \Gamma_1$$

$$\left[-v_n C(x, y, t) + D_n \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial n} \right] |_{\Gamma_2} = \varphi \quad x, y \in \Gamma_2$$

式中: C_0 —潜水初始浓度值(mg/l); C_1 —第一类边界浓度值(mg/l); φ —第二类边界溶质通量($mg/m^2 \cdot d$); v_n —二类边界法线方向上水流速度(m/d); D_n —二类边界法线方向的弥散系数(m^2/d)。

潜水层水流模型和溶质运移模型可利用 GMS 软件中的 MODFLOW 和 MT3D 模型分别进行求解,利用 MODFLOW 计算得到流场的基础上,利用 MT3D 模型对研究区污染物运移进行模拟。MT3DMS 模型与 MODFLOW 模型联合使用,自动获取运移模型求解需要的水头数据和源汇项数据^[4]。MODFLOW 的优点是程序结构的模块化、离散方法的简单化以及计算方法的多样化,由于存在诸多优点,MODFLOW 已被广泛用来模拟井流、溪流、河流、排泄、蒸发和补给对非均质和复杂边界条件的水流系统的影响^[5]。MT3D 采用与 MODFLOW 类似的模块化程序结构,溶质运移过程中的对流、弥散、化学反应以及源汇项影响都分别由独立的程序模块完成,利用

三阶 TVD 格式用于求解对流项,具有保持质量守恒和使数值弥散和人为振动最小化的特点^[5]。

1.3 包气带与潜水层模型耦合计算灰场库容

首先给定一个包气带模型时段数,时间步长已定,利用包气带溶质运移模型的解析解计算灰水污染物在不同时刻运移到潜水面的浓度,作为源强输入至 map 模块下 Recharge 覆盖层中的灰场网格位置,然后利用 MT3D 模型动态模拟污染物在潜水中的运移,MT3D 模型所需潜水流速数据由 MODFLOW 模型计算提供,通过计算得到污染物运移到下游水源地的浓度峰值,若浓度峰值大于环境质量标准,减少包气带模型的时段数,Recharge 覆盖层中所对应时段的源强变为 0,然后重复上述运算,否则,增大入渗带模型时段数,Recharge 覆盖层中对应时段的源强被输入,通过反复计算,浓度峰值正好不超过环境质量标准可得到一包气带时段数,乘以对应的时间步长为最大灰水排放时间,最大灰水排放时间与灰水排放速率以及灰水比的乘积即为灰场合理库容。灰场库容计算流程如图 1 所示。

2 应用实例

某热电厂位于我国北方黄河中游地区,建成于上世纪 70 年代,电厂拥有贮灰场一座,位于厂区北部 3 km 处,灰场面积为 50 万 m²,电场小时冲灰用水量为 853.5 m³,其中 692.5 m³ 灰水在灰场通过竖井经引水沟到澄清池,用泵打回电厂重复利用。灰场北约 1500 m 处有地下水水源地一座。研究区地下水主要为第四系孔隙水,包括山前倾斜平原孔隙含水系统和冲湖积平原孔隙含水系统,山前倾斜平原潜水埋深在 10~70 m 之间,冲湖积平原潜水埋深在 3~10 m 之间。区域年平均降水量 500 mm,年平均蒸发量 1250 mm。由于灰水中氟化物浓度很高,灰场周围地下水中的氟化物一般都超过环境质量标准,另外,引用水中氟化物浓度高会对人体造成极大危害,故选择氟化物为模拟因子。根据 GB5949-85《生活饮用水卫生标准》,饮用水中氟化物浓度应小于等于 1 mg/l。

2.1 概念模型

根据研究区的区域地质、地貌、气象水文、介质空间结构、地下水位连续性、边界与环境的输入输出以及其它水文地质条件,建立研究区的水文地质概念模型,进而建立相应的数学模型^[7]。研究区南部为山区,基岩裂隙水向研究区排泄,视为流量边界;北部黄土台垣不含潜水,承压水与研究区潜水无水力联系,视为隔水边界;所划定的东部边界与流线垂直,视为

隔水边界;区域西部地势较高,有潜水流入研究区域,西部边界视为流量边界。根据该区域水文地质剖面图和钻孔资料,选取 60 m 深度内的潜水含水层作为计算的目标层,含水层厚度在 10~60 m 之间,潜水含水层下部约 20~30 m 的亚砂土和亚粘土,构成本区潜水含水层稳定的隔水底板,潜水含水层的上边界为自由水面,通过该边界,地下水系统与外界发生垂向水量交换,如降水和灌溉入渗、潜水蒸发等。根据潜水层岩性的不同,研究区可划分成若干个渗透系数分区,在分区内,水流概化为平面二维均质各向同性非稳定流。根据表层土壤的岩性、潜水埋深等情况,将研究区划分为若干个降雨入渗分区。区域地下水排泄以人工开采为主,除了两个集中开采水源地之外,在其它区域,人工开采量在区域面积上均匀分配。区域边界及初始水位分布如图 2 所示。

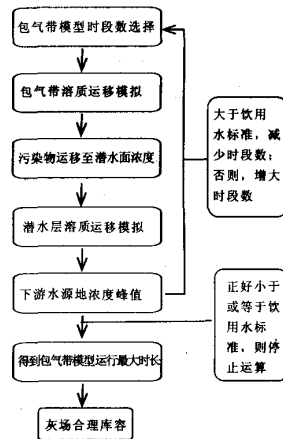


图 1 灰场合理库容计算流程图

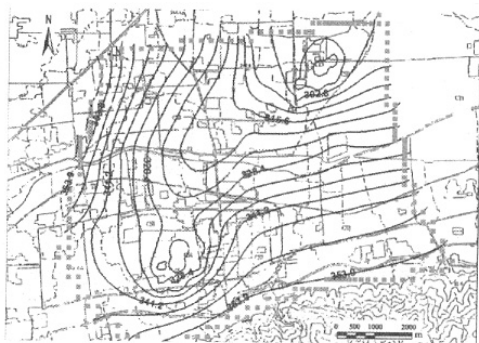


图 2 研究区边界及初始时刻潜水位等值线图

2.2 参数确定

本次模型计算所涉及的参数主要通过室内实验、收集资料等方式获得。利用中性离子氯离子进行土柱穿透试验,通过反演拟和方法可得到包气带土壤的弥散系数,具体过程为:首先给定弥散系数初值,与其他

已知参数一并带入数学模型,计算各时刻氯离子的浓度,然后与渗滤液中氯离子浓度实测值进行拟合,若不满足要求,调整弥散系数进行反复计算,直到满足要求为止;包气带土壤对氟化物的分配系数的计算与上述弥散系数计算过程相似,具体过程为:首先给定分配系数的初值,与上面得到的弥散系数等已知参数一并代入数学模型,计算氟化物的浓度与实测值进行比较,拟合效果不好则修正初值,直到计算值与实测值拟合满意为止。潜水面渗透系数、弥散系数和给水度等水力参数参考前人在本地区工作成果给定,并使用实测水位资料、气象资料以及潜水开采资料对这些参数进行识别,识别后的参数利用观测数据进行参数有效性检验。

2.3 模拟计算

(1)入渗带模拟计算

首先给定一个包气带时段数,时间步长取100天,然后利用包气带模型模拟氟化物在包气带的运移,本次模拟利用模型的解析解计算氟化物排放浓度为14.5 mg/l的灰水由灰场底部运移至距地表2 m处潜水面的浓度,这些浓度值将作为源强输入至潜水面模型。为了方便计算,本次模拟计算了从灰水开始排放到灰场底部土壤达到吸附饱和整个过程中灰水中氟化物运移至潜水面的浓度,计算结果如图3所示。在潜水面模型计算中,可以任意选取某个包气带时段数所对应的一组源强。由图可知,当入渗带应力期个数为16时,即灰水排放1600天,氟化物开始运移至潜水面,随后,潜水面处氟化物浓度逐渐增大,当灰场底部土壤对氟化物的吸附达到饱和时,潜水面处的氟化物浓度达到排放时浓度。

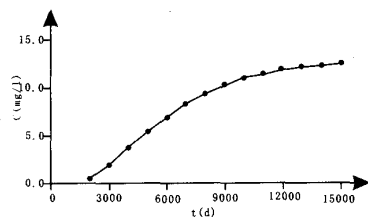


图3 氟化物运移至潜水面的浓度随时间变化曲线

(2)潜水面水流模拟计算

利用MODFLOW模拟的具体步骤为:首先导入用世界坐标表示的区域地图作为背景图;然后利用GMS的地图控制模块map中的GIS工具来确定模拟边界、地层水力参数以及源汇项等数据^[8],GIS工具创建的覆盖层包括:Sources/Sinks层、Recharge层以及hydraulic conductivity层等;概念模型创建之后,对模拟区域进行网格剖分,研究区被剖分为50×

40个方形网格;随后插入地层高程数据和初始水位数据,初始水位为灰场开始投入运行时的水位;再利用Global/Basic包定义应力期,本次模拟的时段数为150个,时间步长为100天;最后模型利用SIP(强隐式迭代子程序包)来进行计算,得到不同时刻所对应的研究区潜水流场。

(3)潜水面溶质运移计算

利用MT3D模型模拟氟化物在地下水中运移的具体步骤为:首先利用map模块在水力参数覆盖层中设置弥散度和有效孔隙度等参数;然后在Recharge覆盖层的灰场位置输入对应时段的灰水氟化物源强数据,这些浓度数据来自包气带模型的模拟计算;利用Chemical Reaction包选择吸附类型,输入吸附参数,本次计算选择线形等温吸附模式;随后利用Advection包选择对流计算的算法,本次计算选择TVD法,利用GCG包(广义共轭梯度法)对模型矩阵方程进行迭代计算。在选择不同包气带模型模拟时段数的情况下,利用包气带和潜水面模型计算,求解得到氟化物峰面运移到下游水源地时的浓度分布。

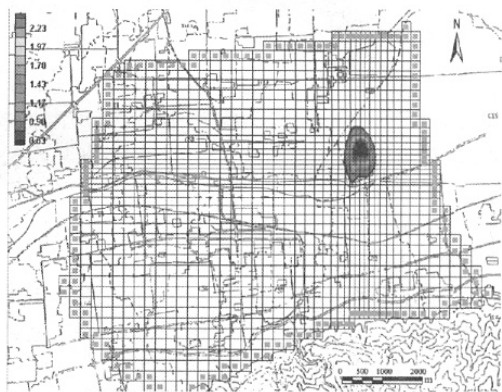


图4 潜水面模型运行4800天氟化物浓度等值线图

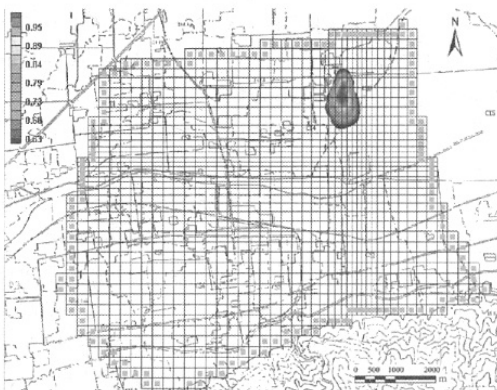


图5 潜水面模型运行12600天氟化物浓度等值线图

图4、图5给出了包气带模型模拟时段数为48时,潜水层模型模拟时段数分别为48和126情况下的氟化物在潜水层中的浓度分布,潜水层应力期个数为48,即潜水层模型运行4800天,此时灰场停止排灰。由潜水层氟化物浓度分布可知,灰水停排时氟化物羽状体位于灰场附近,最大浓度为2.59 mg/l,在12600天,羽状体运移至下游水源地附近,峰面位于下游水源地,浓度为0.99 mg/l,以上两个不同时刻的浓度等值线图直观地反映了污染物羽状体的运移以及峰值的削减。

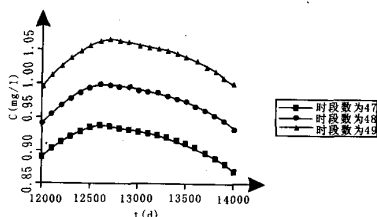


图6 羽状体经过下游水源地氟化物浓度随时间变化曲线
(4)模型耦合确定灰场库容

给定一个包气带模型模拟时段数,利用包气带模型计算得到一组不同时刻氟化物运移至潜水面的浓度,作为源强带入潜水层模型,利用潜水层模型计算氟化物运移至下游水源地的浓度分布,调整包气带模型模拟时段数,通过反复计算得到当包气带时段数为47、48和49情况下,氟化物羽状体经过下游水源地时的浓度变化,如图6所示。从图中可以明显看出下游水源地处氟化物浓度峰值的出现与消失,包气带模型模拟时段数为47、48和49情况下,氟化物经过在潜水层中的运移,当峰面到达下游水源地时,水源地潜水中氟化物浓度分别为0.94 mg/l、0.99 mg/l和1.06 mg/l,相应的潜水层溶质运移模型模拟时段数分别为126、126和127,也就是说在灰场排灰时间为4700天、4800天和4900天情况下,从灰水开始排放到氟化物峰值运移至下游水源地所需时间分别为12600天、12600天和12700天。从数据分析可知,当包气带模型模拟时段数为48时,即灰场排灰4800天时,氟化物运移到下游水源地的浓度峰值正好小于饮用水标准,峰值浓度为0.99 mg/l。得到最大排灰时间后,最大排灰时间4800天与排放速率89.6 m³/h以

及灰水比1:15的乘积即为灰场合理库容 6.88×10^5 m³。

3 结语

针对目前电厂灰场库容设计没有合理的标准,灰场库容随意扩大,造成潜水污染严重的问题,本文以灰水污染物运移至下游水源地的浓度峰值不超过环境质量标准为依据,建立了包气带与潜水层溶质运移耦合数学模型,经计算得到灰场合理库容,包气带模型与潜水层模型分别利用解析解和GMS软件进行了求解。要解决灰水对地下水的污染问题同时扩大灰场库容,灰场底部防渗和增大灰水循环利用量是必要的措施,本文提供的方法可以计算采取不同措施情况下的灰场库容,指导灰场防渗工程以及灰水回收工程的设计。本文包气带模拟考虑的是稳态水流状况下的模拟,包气带溶质运移模型中流速取的是平均值,但是入渗初期水流并非稳态,并且含水量在垂向上的分布有所差异,如果利用入渗带水流模型对入渗带水势进行模拟,得到的入渗带流速将更准确,模拟的精度也会更高。

参考文献

- [1] 李桂中. 电力建设与环境保护 [M]. 天津大学出版社, 2002.
- [2] 刘兆昌,等. 地下水污染与控制 [M]. 中国环境科学出版社, 1991.
- [3] 孙訥正. 地下水污染——数学模型和数值方法 [M]. 地质出版社, 1989.
- [4] 刘建立. 大武水源地裂隙岩溶水中石油类污染物运移机制及数值研究 [D]. 南京大学, 2000.
- [5] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件. 水文地质工程地质 [J], 2003(5): 53~55.
- [6] 丁继红. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势. 勘查科学技术 [J], 2002(1): 37~42.
- [7] 李俊亭. 地下水流数值模拟 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [8] User's Manual, Groundwater Modeling System [M]. Brigham Young University, 1998.