

# 粉煤灰水在土壤包气带中的垂直迁移规律

时 红<sup>1</sup>, 张永波<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要** :以太原二电厂阳坡沟粉煤灰场为例, 建立灰水中污染物在土壤包气带的垂直迁移规律模型。通过数值计算可知, 灰水污染物  $F^-$  和  $As$  垂直入渗到达含水层中的浓度与包气带土壤渗透系数、吸附分配系数的关系均呈线性关系, 灰水污染物  $F^-$  到达含水层时的浓度与包气带土壤厚度的关系呈线性关系, 污染物  $As$  的浓度与包气带土壤厚度的关系呈多项式曲线关系。

**关键词** :粉煤灰; 土壤; 包气带; 迁移规律

**中图分类号** :X53      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2007)03-0030-03

## Law of Vertical transfer of fly ash water in aeration zone of soil

SHI Hong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-bo<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Engineering of TUT, Taiyuan 030024, China; 2. College of Hydraulic Engineering of TUT, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** :Taking the fly ash field in the second power plant of Taiyuan as a case, a vertical transfer model of pollutants in fly ash water in aeration zone of soil was established. By numerical method, it is concluded that the concentration of  $F^-$  and  $As$  percolating into the aquifer varies linearly with penetration coefficient and adsorbed distribution coefficient of soil. The concentration of  $F^-$  varies linearly with the soil depth of the aeration zone of soil, while that of  $As$  is of a polynomial relationship with the depth.

**Key words** :fly ash; soil; aeration zone; transfer law

火电厂粉煤灰场建成储灰后, 灰水将通过包气带向下垂直入渗, 灰水中的有害成分也会入渗进入含水层中, 造成地下水的污染<sup>[1]</sup>。一般情况下, 包气带的垂向入渗系数较小, 渗透速度较慢, 加之包气带具有一定的自净能力, 因此短期内对地下水水质可能不会造成太大影响。但是, 由于粉煤灰场区长期滞存灰水, 土壤的环境容量将逐渐减小, 地下水污染会逐渐加重<sup>[2]</sup>。

### 1 模型的建立与求解

#### 1.1 一维垂直入渗模型的建立

以太原二电厂阳坡沟粉煤灰场基本条件为例, 建立污染质的一维垂直入渗模型, 用以研究灰水中污染物在包气带中的垂直迁移规律。

根据区域水文地质及工程地质资料, 阳坡沟灰场地处棋子山黄土丘陵区, 灰场区上部为第四系黄棕色、浅灰色黄土和棕黄色粉质黏土, 含钙质结核及棕黄色黏性土条带, 垂直节理发育, 厚度约 10 ~ 40 m; 下部为第三系紫红色粉质黏土, 含钙质结核层位稳定, 结构致密, 厚度约 28 ~ 66 m, 可视为良好的隔水层。区域地下水埋深 10 ~ 50 m。

采用一维数值模型来模拟和预测灰水污染物进入土壤饱水带以前在包气带中的变化趋势。灰水对下部含水层的垂直入渗, 视为一连续污染源, 水流在垂直方向上具有稳定的渗透流速, 水流流态为层流, 且满足达西定律, 并考虑污染物在下渗过程中土壤介质对其的吸附作用。

根据水文地质模型的概化结果<sup>[3]</sup>, 灰场计算区

数学模型可由两个定解问题联立而成：

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon \\ h(z, t) \Big|_{t=0} &= h_0(z) \quad (0 < z < M) \\ h(z, t) \Big|_{t>0} &= g_1(z, t) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} D \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - v \frac{\partial \rho}{\partial z} &= \left( 1 + \frac{\rho}{n} K_d \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \rho(z, 0) \Big|_{t=0} &= 0 \\ \rho(0, t) \Big|_{t>0} &= \rho_0 \\ T &= kM \end{aligned} \right\} (2)$$

式中： $h(z, t)$ 为任意点 $z$ 在时刻 $t$ 的水位； $h_0$ 为初始水位； $\varepsilon$ 为垂直补给强度； $T$ 为导水系数； $k$ 为渗透系数； $M$ 为包气带土壤层的厚度； $u$ 为储水系数； $\rho(z, t)$ 为任意点 $z$ 在时刻 $t$ 的污染物质量浓度； $\rho_0$ 为污染源浓度； $K_d$ 为吸附分配系数； $D$ 为弥散系数； $v$ 为 $z$ 方向的渗透速度； $\rho$ 为土的密度； $n$ 为土壤层的有效孔隙度； $z$ 为污染物沿垂直方向迁移的距离。

## 1.2 模型的求解

选择 $F^-$ 和As作为模拟因子，利用式(1)、(2)和有限差分法计算太原二电厂阳坡沟灰场灰水渗入地下水浓度<sup>[4]</sup>，计算结果见表1。

表1 灰水中污染物质量浓度 mg/L

质量浓度	$\rho(F^-)$	$\rho(As)$
实测值	1.78	0.10
预测值	1.05	0.06

## 2 灰水污染物在包气带中的垂直迁移规律

粉煤灰对地下水的污染程度除与灰水污染物质的浓度有关外，还受到灰场包气带的渗透性能、包气带土壤对污染物的吸附能力及包气带地层的厚度等因素的影响。利用一维数值模拟模型，探讨包气带渗透系数、吸附分配系数及包气带厚度变化等对灰水污染物在包气带中迁移规律的影响。

### 2.1 包气带渗透系数

在计算模型中，其他条件和参数保持不变，仅改变包气带土壤的平均渗透系数数值，分别计算灰水中 $F^-$ 和As到达含水层时的浓度。

由计算结果可以看出，灰水中 $F^-$ 、As在不同土壤中垂直入渗，因土壤渗透系数不同，其垂直入渗到达含水层的时间及到达含水层时的浓度均有所不同。 $F^-$ 在渗透系数为 $10^{-2}$ m/d的土壤入渗到地下水约需6.8a，渗透系数为 $10^{-4}$ m/d时，需8.5a，渗透系数为 $10^{-6}$ m/d时，需12a。在这3种不同的渗透系数条件下，垂直入渗21a后，进入含水层中 $F^-$

的质量浓度分别可以达到1.39mg/L、1.32mg/L、1.22mg/L。As在渗透系数为 $10^{-2}$ m/d、 $10^{-4}$ m/d、 $10^{-6}$ m/d的土壤中入渗，到达地下水的的时间分别约需6.5a、9a和12.5a。在这3种渗透系数条件下，垂直入渗21a后，含水层中As的质量浓度分别可以达到0.095mg/L、0.088mg/L、0.081mg/L。由此可见，土壤渗透系数越大，土壤的防渗性能越差，灰水污染物到达含水层的时间越短，相同入渗年限含水层中污染物质含量越高。

将不同土壤渗透系数条件下灰水污染物到达含水层的浓度计算结果输入计算机（以入渗21a时计算结果为例），进行各种类型的曲线拟合，对拟合的结果进行拟合优度检验和显著性检验，选择拟合优度最佳的曲线类型。曲线拟合结果如图1所示。

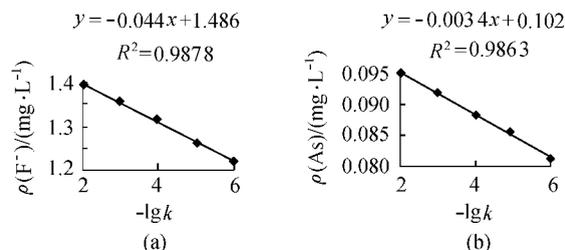


图1 渗透系数与污染物浓度的关系

### 2.2 包气带吸附分配系数

土壤对各项污染物的吸附性能主要取决于土壤的吸附分配系数。在其他参数不变的情况下，仅改变土壤的吸附分配系数大小，代入一维数值模型计算，可求得不同土壤吸附分配系数条件下灰水污染物到达含水层时的浓度<sup>[5]</sup>。

由计算结果可知， $F^-$ 在吸附分配系数为5.887L/kg的土壤入渗，到达地下水的的时间约需6.5a，吸附分配系数为6.887L/kg时，需9a，吸附分配系数为7.887L/kg时，需11.5a。在这3种吸附分配系数条件下，垂直入渗21a后，到达含水层中 $F^-$ 的质量浓度分别为1.40mg/L、1.31mg/L、1.24mg/L。As在吸附分配系数为5.887L/kg、6.887L/kg、7.887L/kg的土壤入渗，到达地下水的的时间分别约需6a、8.5a和12.8a。在这3种吸附分配系数条件下，垂直入渗21a后，到达含水层中As的浓度分别为0.098mg/L、0.09mg/L、0.083mg/L。可见，土壤的吸附分配系数越大，土壤对灰水中污染物的吸附性越大，灰水污染物到达含水层的时间越长，相同入渗年限含水层中污染物质含量越小。

同理，将不同土壤吸附分配系数条件下，灰水污染物到达含水层的浓度计算结果输入计算机（以入渗21a时计算结果为例），绘制吸附分配系数 $K_d$ 与到达含水层中污染物的质量浓度之间的关系曲线，

如图 2 所示。

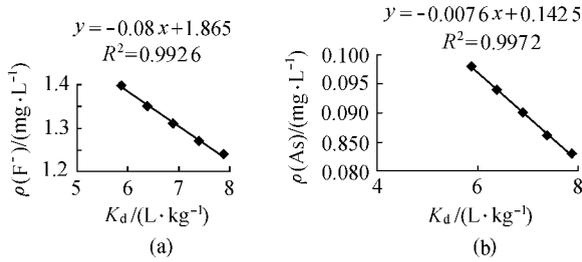


图 2 吸附分配系数与灰水污染物浓度的关系

### 2.3 包气带厚度

包气带的厚度同样会影响灰水污染物入渗到达含水层时的浓度。在其他参数不变的情况下,仅改变包气带的厚度,可求得不同包气带厚度条件下灰水污染物到达含水层时的浓度。

灰水污染物在包气带土壤中垂直入渗,因包气带厚度不同,其垂直入渗到达含水层的时间及到达含水层时的浓度也不同。 $F^-$  在厚度为 8m 的包气带土壤中入渗,到达地下水的的时间约需 6a;包气带厚度为 18m 时,需 8.2a;包气带厚度为 28m 时,需 12.8a。在这 3 种厚度的包气带土壤中  $F^-$  垂直入渗,21a 后,含水层中  $F^-$  的质量浓度分别为 1.28 mg/L、1.18 mg/L、1.14 mg/L。 $As$  在厚度为 8m、18m、28m 包气带土壤中入渗,到达地下水的的时间约需 6a、8.9a 和 12.5a,在这 3 种厚度的包气带土壤中垂直入渗,21a 后,含水层中  $As$  的质量浓度分别为 0.096 mg/L、0.093 mg/L、0.08 mg/L。由此可见,包气带厚度越大,灰水污染物入渗到含水层所用时间越长,相同入渗年限含水层中污染物含量越小。

将不同包气带厚度条件下,灰水污染物到达含水层的浓度计算结果输入计算机(以入渗 21a 时计算结果为例)绘制关系曲线,如图 3 所示。

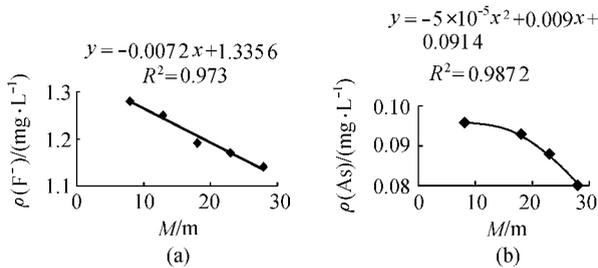


图 3 包气带厚度与灰水污染物浓度的关系

## 3 结论

粉煤灰水对地下水的污染,不但受到灰水本身所含污染物质的浓度影响,而且与煤灰场包气带土壤的渗透性能、土壤对污染物的吸附能力及包气带土壤的厚度等因素有关。灰水污染物在包气带垂直入渗若干年后,含水层中污染物浓度大小与土壤的

渗透系数呈正相关,与包气带土壤的吸附分配系数和包气带地层的厚度呈负相关。

由包气带渗透系数与灰水污染物到达含水层浓度关系曲线和包气带吸附分配系数与灰水污染物到达含水层的浓度关系曲线可知,灰水污染物  $F^-$  和  $As$  垂直入渗到达含水层中的浓度与包气带土壤渗透系数及包气带土壤的吸附分配系数均呈线性关系;由包气带厚度与灰水污染物到达含水层的浓度关系曲线看出,灰水污染物  $F^-$  到达含水层时的浓度与包气带土壤厚度的关系呈线性关系,污染物  $As$  的浓度与包气带土壤厚度的关系呈多项式曲线关系。

### 参考文献:

- [1] 孙中惠,郭建新.粉煤灰对太原市地下水造成的放射性污染[J].华北地质矿产杂志,1996,11(2):199-208.
- [2] 许光泉,陈艺.粉煤灰中污染离子淋释试验及其运移模型[J].煤田地质与勘探,1999,27(1):48-51.
- [3] 黄爽,蔡树英.电厂粉煤灰场对地下水环境影响的初步研究[J].武汉大学学报,2001,34(5):7-11.
- [4] 陈德放,李其萍.火力发电厂的排灰场对土壤及浅层地下水的影响研究[J].中国环境监测,1997,13(3):33-36.
- [5] 许佩瑶,朱洪涛.保定电厂冲灰水下渗污染地下水的数学模型[J].安全与环境学报,2003,3(6):6-8.

(收稿日期 2005-10-18 编辑 舒建)

(上接第 16 页)程度,得到的评价级别是最接近的那一类水质级别。Hopfield 网络在进行水质的大致分级时,是一种很好的方法,因为它的评价过程简单、方便,评价的结果也比较可靠。

### 参考文献:

- [1] 高键磊,吴泽宁,左其亭,等.水资源保护规划理论方法与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [2] 徐大伟,杨扬.模糊数学法在河流水质综合评价中的应用[J].沈阳大学学报:自然科学版,2000(2):59-62.
- [3] 贺北方,王效宇.基于灰色聚类决策的水质评价方法[J].郑州大学学报:工学版,2000(3):10-13.
- [4] 李如忠.水质综合评价灰关联模型的建立与应用[J].安徽建筑工业学院学报:自然科学版,2000(1):46-49.
- [5] 冯玉国.物元分析在水质综合评价中的应用[J].华东地质学院学报,1994(9):281-286.
- [6] 李祚泳,邓新民.人工神经网络在水环境质量评价中的应用[J].中国环境监测,1996(12):36-39.
- [7] 李正最.水质综合评价的 BP 网络模型[J].甘肃环境研究与监测,1998(2):24-27.
- [8] 龙腾锐,郭劲松,霍国友.水质综合评价的 Hopfield 网络模型[J].重庆建筑大学学报,2000(4):57-60.
- [9] 陈祥光,裴旭东.人工神经网络技术及应用[M].北京:中国电力出版社,2003.

(收稿日期 2005-11-28 编辑 舒建)