

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.009

# PTA 化工厂污水对地下水污染的风险评价及对策

杨春晓, 刘长礼, 王翠玲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050803)

**摘要:** 通过对洛阳市某 PTA 化工厂进行工程勘察和吸附实验、生物降解实验、土柱淋滤实验求取了包气带物质运移的相关参数, 利用 Hydrus-1D 软件对 COD<sub>Cr</sub> 在蓄水池下包气带中的迁移进行了模拟预测。结果显示, 不采取防渗措施时, 正常工况、非正常工况、一般事故和风险事故 4 种工况下, COD<sub>Cr</sub> 从蓄水池底部超标迁移至潜水所需要的时间分别为 5.4 a、5.4 a、4.9 a、3.8 a, 该污水蓄水池污染当地地下水风险很高; 若在蓄水池下铺设 2.5 m 厚的黏性土垫层, 则四种工况下 COD<sub>Cr</sub> 从蓄水池底部超标迁移至潜水所需要的时间分别为 12.2 a、10.5 a、9.1 a、6.8 a。

**关键词:** 包气带; 地下水; 数值模拟; 风险评价

**中图分类号:** P641; X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0439-05

## Risk assessment and control countermeasures of groundwater pollution caused by PTA chemical plant sewage

YANG Chun xiao, LIU Chang li, WANG Cui ling

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050803, China)

**Abstract:** Engineering investigation and a series of experiments, including the static adsorption, biodegradation, and dynamic soil column leaching experiments, were conducted at a PTA chemical plant in Luoyang to determine the solute transport parameters in the vadose zone. The migration of COD<sub>Cr</sub> in the vadose zone of the sewage reservoir was simulated using Hydrus-1D. The results showed that (1) it takes 5.4, 5.4, 4.9, and 3.8 years for COD<sub>Cr</sub> to migrate from the reservoir bottom to water table under the normal, abnormal, ordinary accident, and risk accident conditions respectively without any anti-seepage measures, and the groundwater pollution risk caused by the sewage reservoir is high; and (2) it takes 12.2, 10.5, 9.1, and 6.8 years for COD<sub>Cr</sub> to migrate from the reservoir bottom to water table under the normal, abnormal, ordinary accident, and risk accident conditions respectively if there is a 2.5 m thick clay layer under the sewage reservoir.

**Key words:** vadose zone; groundwater; numerical simulation; risk assessment

精对苯二甲酸(Purified Terephthalic Acid, 简称 PTA)是生产涤纶短纤和聚酯的主要原料, 随着其生产规模的不断扩大, 工厂 PTA 废水的排放迅速增加。PTA 废水主要包括工艺废水、残渣浆料和清洗废水<sup>[1]</sup>, 属于有机物浓度高、成分复杂且难以降解的化工废水, 其 COD<sub>Cr</sub> 浓度高达 4 000~10 000 mg/L, 是城市生活污水的几十倍<sup>[2]</sup>。因此若直接排放这些有机废液会向下迁移进入包气带造成土壤污染, 甚至通过包气带迁移至地下水中造成地下水的严重污染, 威胁人类的身体健康<sup>[3-6]</sup>。

洛阳市某化工厂年产 100 万 t PTA, 排污水总量约 305 m<sup>3</sup>/h。场地包气带介质为第四系黄土, 地下水资源丰富, 水质优良, 不仅是周边横涧、全义、上河、清庄、坡底、顺涧等村

庄居民饮用水水源, 更是该石油化工基地 10 多万人生产与生活水源。本文通过吸附实验、生物降解实验、土柱淋滤实验获取了研究区在包气带中的物质迁移规律及其相关参数, 并采用 Hydrus 1D 对 COD<sub>Cr</sub> 的迁移能力进行模拟预测, 同时提出相应的污染防控对策。

## 1 参数获取

### 1.1 实验方法

#### 1.1.1 土壤取样与预处理

取样: 供试土样为洛阳市某生产 PTA 的化工厂附近未受污染的粉质黏土。供试土壤的物理参数见表 1。

收稿日期: 2014-06-28 修回日期: 2015-01-09 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1539.017.html>

基金项目: 国家科技支撑计划课题“城市发展中的地质环境风险评估与防控关键技术研究及示范”(2012BAJ11B04); 中国地质调查局地质调查项目“中原城市群城市地质环境地质调查”(12120113004600)

作者简介: 杨春晓(1991-), 女, 山东德州人, 主要从事城市固体垃圾处理研究。E-mail: yangchunxiaoy@126.com

通讯作者: 刘长礼(1963-), 男, 贵州人, 研究员, 博士, 主要从事水文地质、环境地质方面研究。E-mail: liuchangli@vip.163.com

预处理:将所取新鲜土样自然风干,去除其中的植物根等杂物,然后将风干后的样品研磨过 20 目筛后密封备用。

表 1 实验用土的物理性质

Tab.1 Physical properties of soils used in the experiments

土样	粉质黏土
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.79~1.90
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.47~1.69
天然容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	17.50~18.10
干容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	14.40~15.60
含水量(%)	19.96
(<0.005 mm) 粒组百分比	19.60
(0.005~0.075 mm) 粒组百分比	80.40
渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	3.21×10 <sup>-5</sup>

### 1.1.2 COD<sub>Cr</sub>测定方法

实验中 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度的测定均采用重铬酸钾滴定法:取 3 mL 待测上清液,分别加入 1 mL 掩蔽剂、3 mL 消化液和 5 mL 催化剂,然后放入 COD 消解仪中在 165 °C 条件下消解 15 min,最后滴加 3 滴指示剂,用硫酸亚铁铵滴定,计算 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度。

## 1.2 实验结果

### 1.2.1 吸附分配系数

经过 45 h 的恒温振荡,得到 COD<sub>Cr</sub> 在粉质黏土中的吸附动力学数据,COD<sub>Cr</sub> 在粉质黏土中的吸附动力学曲线见图 1。

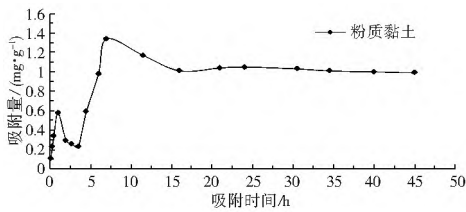


图 1 COD<sub>Cr</sub> 在粉质黏土中的吸附动力学曲线

Fig.1 Kinetic adsorption curve of COD<sub>Cr</sub> in silty clay

由图 1 可知,废液中 COD<sub>Cr</sub> 在粉质黏土中的吸附分为 3 个阶段:第一阶段为 0~1 h,为线性快速吸附阶段,吸附量迅速达到 0.58 mg/g;第二阶段为 1~5 h,为解吸-再吸附阶段,迅速解吸到 0.23 mg/g,随后再次吸附至 0.59 mg/g;第三阶段为 5 h 以后,为平衡吸附阶段,吸附量变化幅度小,最大吸附量发生在 7 h,达 1.34 mg/g。

根据该曲线确定粉质黏土对 COD<sub>Cr</sub> 的吸附平衡时间为 24 h,平衡时的吸附量为 1.05 mg/g。

通过不同浓度的等温吸附实验得到的等温吸附数据,在 origin 8.5.1 软件中,分别用线性等温吸附方程、Langmuir 等温吸附方程和 Freundlich 等温吸附方程对数据进行拟合,分别得到各模型等温吸附曲线,见图 2。

根据拟合方程,得到各等温吸附方程的参数,见表 2。

由图 2 和表 2 可以看出,线性等温吸附方程与实验数据拟合最好,相关系数是 0.937 27。其中,Langmuir 等温吸附方程中的 S<sub>m</sub> 的值为负值,与实际情况相违背(实验选用未受污染的土样)。因此选用线性等温吸附方程来描述粉质黏土

对废液中 COD<sub>Cr</sub> 的吸附,分配系数为 K<sub>d</sub> 为 0.263 cm<sup>3</sup>/g。

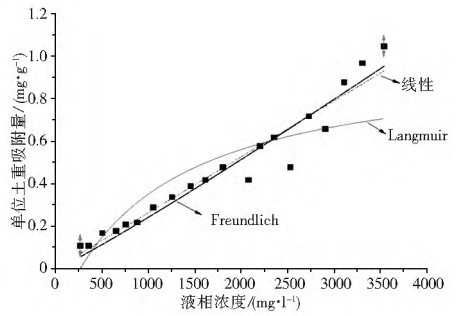


图 2 粉质黏土对 COD<sub>Cr</sub> 的等温吸附曲线

Fig.2 Adsorption equilibrium curves of COD<sub>Cr</sub> in silty clay

表 2 粉质黏土对 COD<sub>Cr</sub> 吸附等温线拟合参数

Tab.2 Fitting parameters for COD<sub>Cr</sub> adsorption in silty clay

线性等温吸附方程	Langmuir 等温吸附方程	Freundlich 等温吸附方程
$S = K_d C + b$	$S = \frac{S_m + K_1 C}{1 + K_1 C}$	$S = K_f C^n$
$K_d = 0.263 \times 10^{-3}$	$K_1 = 0.919 \times 10^{-3}$	$K_f = 0.140 \times 10^{-3}$
$b = 0.00148$	$S_m = -0.24282$	$n = 1.07706$
$R^2 = 0.93727$	$R^2 = 0.76148$	$R^2 = 0.93488$

### 1.2.2 生物降解系数

称取若干份 50 g 土置于 100 mL 三角瓶中,加入废液 100 mL。此时三角瓶基本被填满,可视为厌氧状态。生物降解初期测得的 COD<sub>Cr</sub> 背景值分别是 87.01 mg/L,计算时用测定的 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度减去背景值。采用一级动力学方程  $C = C_0 e^{-\lambda t}$  对处理后的粉质黏土对废液中 COD<sub>Cr</sub> 的降解数据进行拟合,得出方程:

$$C = 766.23e^{-0.0101t}, R^2 = 0.76726 \quad (1)$$

其规律曲线见图 3,可以看出粉质黏土对废液中 COD<sub>Cr</sub> 的降解能力较低,生物降解系数 λ 为 0.0101 d<sup>-1</sup>。

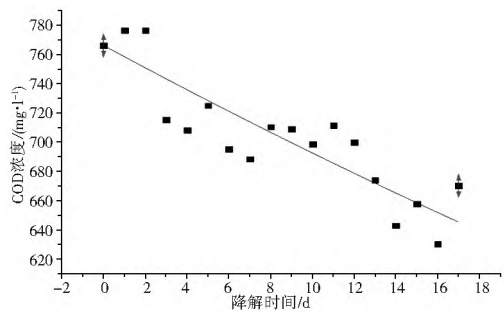


图 3 废液中粉质黏土对废液中 COD<sub>Cr</sub> 的降解规律

Fig.3 Degradation curve of COD<sub>Cr</sub> in silty clay

### 1.2.3 土柱淋滤实验与弥散度

土柱淋滤分为 Cl<sup>-</sup> 穿透实验和废液淋滤实验。

(1) Cl<sup>-</sup> 穿透实验。保持水头为土层表面以上 30 cm 不变,将一定浓度的 NaCl 溶液注入到 A 土柱中,每隔 5~10 h 接取一次淋出液,进行浓度测定。当取样溶液中的 Cl<sup>-</sup> 浓度与初始浓度相等时停止实验。最后根据 Cl<sup>-</sup> 浓度与相对应的时间 t 绘制出穿透曲线,结果见图 4。可以看出,0~30 h 的时间段没有 Cl<sup>-</sup> 淋出;30~90 h 内 Cl<sup>-</sup> 有检出且浓度快速增长,最大值出现在 90 h。

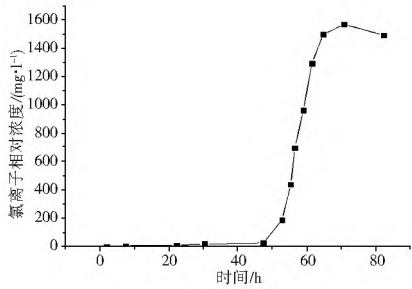


图4 Cl<sup>-</sup>在粉质黏土柱中的穿透曲线

Fig. 4 Breaking curve of Cl<sup>-</sup> in the silty clay

弥散系数  $D$  可根据“三点公式”(饱和土壤的溶质迁移纵向弥散系数近似解)得到:

$$D = \frac{v}{8t_{0.5}}(t_{0.84} - t_{0.16})^2 \quad (2)$$

$$v = \frac{L}{t_{0.5}} \quad (3)$$

式中:  $t_{0.16}$ 、 $t_{0.5}$ 、 $t_{0.84}$  分别为  $C_t/C_{max}$  到达 0.16、0.5、0.84 时的时间值。

在不考虑分子扩散的条件下,弥散度  $D_L = D/v$ 。

在图4中选取  $C_t/C_{max}$  到达 0.16、0.5、0.84 时的时间值,通过式(2)、式(3)计算出粉质黏土的弥散系数为  $10.88 \text{ cm}^2/\text{d}$ ,弥散度为  $10 \text{ cm}$ 。

(2) 废液淋滤实验。保持水头为土层表面以上  $30 \text{ cm}$  不变,将一定浓度的PTA废液溶液注入到B土柱中,每隔  $6 \text{ h}$  取样一次,测定  $\text{COD}_{Cr}$  的质量浓度。根据  $\text{COD}_{Cr}$  浓度数据与相对应的时间  $t$  绘制出  $\text{COD}_{Cr}$  穿透曲线。此曲线主要用于验证后文中数值模型的拟合情况。

## 2 地下水污染模拟与预测

地下水污染风险由污染概率与可能造成的污染后果构成<sup>[79]</sup>。

### 2.1 地下水的污染概率评估

该蓄水池场地下水的污染概率主要由污染物穿过蓄水池底部  $10 \text{ m}$  厚的包气带土层可能性决定,这就需要利用前述实验研究取得的参数等结果进行数值模拟,计算污染物在水力作用下在包气带中的迁移能力,即污染物穿过  $10 \text{ m}$  厚土层所需的时间。

#### (1) 水分运动模型。

在刚性多孔介质中,忽略空气热量作用和根系吸水作用,均衡水流垂向运移可以用修正的 Richards 方程描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $h$  为压力水头(m);  $\theta$  为体积含水量(%);  $t$  为时间(d);  $x$  为坐标;  $K$  为饱和渗透系数(m/d)。

在非饱和带中,  $\theta$  和  $K$  均为压力水头  $h$  的非线性函数,可用以下公式表达<sup>[10]</sup>:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |ah|^{-n}]^m} & h \leq 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(h) = K_s S_e^1 \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

其中,  $m = 1 - \frac{1}{n}$  ( $n > 1$ ),  $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

式中:  $\theta_r$ 、 $\theta_s$  分别为残余含水量和饱和含水量(%);  $S_e$  为有效饱和度;  $K_s$  为饱和渗透系数(m/d);  $\alpha$  为空气进气直的倒数(泡点压力)( $\text{m}^{-1}$ );  $m$ 、 $n$  均为土水特征方程的参数;  $l$  为孔隙传导参数,一般为  $0.5$ <sup>[11]</sup>。

#### (2) 反应性溶质迁移模型。

当水中溶质吸附和生物降解分别遵循线性吸附和一级动力学规律时,多孔介质的溶质运移方程如下:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + \lambda C R \quad (7)$$

初始条件:  $C(x, t) = 0; x \geq 0, t = 0$

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} + vC = v_0 C_0; x = 0, t > 0$$

边界条件:  $\frac{\partial h(x, t)}{\partial x} = 0; x = L, t > 0$

式中:  $R$  为溶质迁移阻滞因子,  $R = 1 + \frac{\rho}{\theta_s} K_d$ ;  $K_d$  为溶质在土中的分配系数( $\text{cm}^3/\text{g}$ );  $\lambda$  为生物降解系数( $\text{d}^{-1}$ )。

#### (3) $\text{COD}_{Cr}$ 的运移模型调试与拟合。

根据以上原理,应用 Hydrus 1D 软件根据土壤颗粒分析和土样干密度,利用 Hydrus 1D 中的神经网络预测功能获取包气带的水分运动参数(表3),并对包气带  $\text{COD}_{Cr}$  的运移进行数值模拟,得到  $\text{COD}_{Cr}$  拟合值与实测值的拟合曲线(图5)。由图可见,计算值与实测值拟合程度较高,表示该模型可用于预测包气带中  $\text{COD}_{Cr}$  的运移。计算结果显示,  $10 \text{ cm}$  厚的粉质黏土在  $30 \text{ cm}$  水头废液的淋滤条件下,  $70 \text{ h}$  左右淋出液达到稳定,且淋出液  $\text{COD}_{Cr}$  的浓度最终为  $3000 \text{ mg/L}$  左右。

表3 包气带水分运动模拟参数

Tab. 3 Simulated parameters of water flow in the vadose zone

模拟参数	数值
初始浓度 $C_0 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3000
残留体积含水量 $\theta_r (\%)$	7.12
饱和体积含水量 $\theta_s (\%)$	41.87
土壤水分特征参数 $\alpha / (1 \cdot \text{cm}^{-1})$	0.0068
土壤水分特征指数 $n$	1.5697
饱和水力传导度 $K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	0.24
土密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.58
弥散度 $D_L / \text{m}$	0.10
分配系数 $K_d / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	0.263
降解系数 $\lambda / \text{d}^{-1}$	0.0101

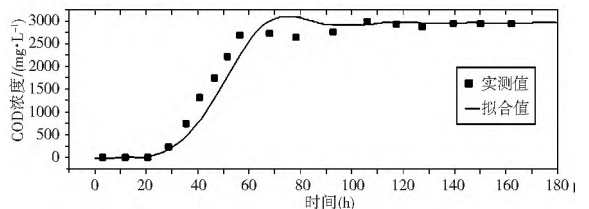


图5 COD 拟合值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between the observed and simulated COD values

### 2.2 地下水污染模拟预测

依据地下水质量标准<sup>[12]</sup>,等级劣于Ⅲ类水不宜饮用。Ⅲ类水的高锰酸盐指数为  $< 3 \text{ mg/L}$ 。根据王秀芹<sup>[13]</sup>等得出的结果:化学需氧量(重铬酸盐法)测定数值为高锰酸盐指数法测定数值的2倍左右,可以计算得出  $\text{COD}_{Cr}$  大于  $6 \text{ mg/L}$

即为地下水超标。由于该污水蓄水池场地之下包气带厚度为 10 m, 因此以下将计算污染物穿过 10 m 包气带时地下水超过 III 类地下水水质所需要的时间。

蓄水池计划蓄水高度为 5 m, 在不考虑降水、蒸发等因素的条件下, 针对正常工况、非正常工况、一般事故和风险事故四种情形下, 设定蓄水池中的初始  $COD_{Cr}$  的浓度为 4 000 mg/L (选取工厂废液中  $COD_{Cr}$  浓度范围中的最低值)、7 000 mg/L、9 000 mg/L、80 000 mg/L, 不采取任何的防护措施, 持续注入此废水时, 利用 Hydrus 1D 进行模拟计算  $COD_{Cr}$  从蓄水池底部迁移 10 m 后,  $COD_{Cr}$  超标所需要的时间, 结果见图 6。可以看出, 四种情形下,  $COD_{Cr}$  从蓄水池底部迁移 10 m 后,  $COD_{Cr}$  刚刚超标所需要的时间分别为 5.4 a、5 a、4.9 a、3.8 a。

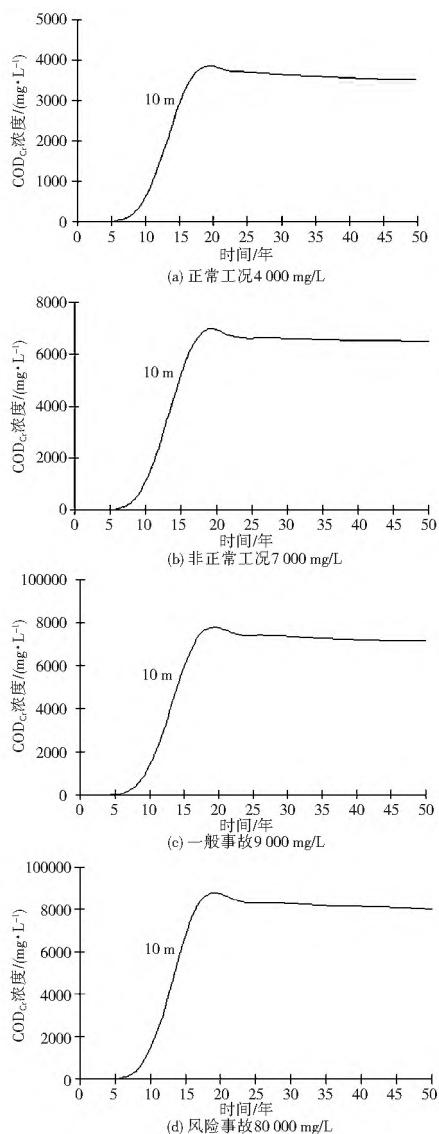


图 6  $COD_{Cr}$  浓度随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of  $COD_{Cr}$  concentrations with time

### 3 地下水的污染风险评价与防控对策

#### 3.1 地下水的污染风险评价

通过上述计算可知, 在初始浓度分别为 4 000 mg/L、7 000 mg/L、9 000 mg/L、80 000 mg/L 的情形下, 洛阳市 PTA 化工厂污水池分别在使用 5.4 a、5 a、4.9 a、3.8 a 后, 将

污染地下水源。由于该地下水源地不仅是周边横涧、全义、上河、清庄、坡底、顺涧等村庄居民饮用水水源, 更是该石油化工基地 10 多万人生产与生活水源, 因此该水源的污染将影响 10 多万人口的石化基地供水, 造成巨大的经济损失。

#### 3.2 地下水污染防控对策

(1) 蓄水池宜采用抗渗钢筋混凝土结构, 最大裂缝宽度不应该大于 0.20 mm, 并不得贯通。

(2) 地基防渗处理以及铺设黏性土垫层。最有效的防控方法是蓄水池底部铺设黏性土垫层, 其成本低, 易操作<sup>[14-18]</sup>。根据模拟计算, 若渗透系数为  $2 \times 10^{-7}$  cm/s 黏性土层厚度为 2.5 m, 那么在同样的条件下, 正常工况、非正常工况、一般事故和风险事故四种情形下, 蓄水池中  $COD_{Cr}$  从蓄水池底部迁移超标进入地下水所需要的时间分别为 12.2 a、10.5 a、9.1 a、6.8 a。因此, 应该重视地基土的防渗处理, 针对包气带地基土的特点, 可选用水泥粉煤灰碎石桩、水泥搅拌桩等地基处理方法, 既可以加固地基, 提高地基承载力, 又可以达到防渗目的。不过, 更重要的还是应该严格控制蓄水池污水初始浓度, 以先进的清洁生产水平减少废水的产生以及控制废水的浓度。

(3) 设置地下水污染监控井。在厂区外地下水水流上游应设不少于 1 眼地下水背景监测井, 厂区外地下水水流下游应设不少于 3 眼地下水污染监测井, 应呈扇形布置。厂区外的地下水污染监控井宜选用取水层与监测目的层相一致、距厂址较近的工业、农业生产用井为监控井; 若无合适井可以利用, 应在厂界外就近设置监控井。另外, 应设置一眼抽水井, 用于地下水污染事故应急处理。

(4) 采取风险事故应急响应措施。事故发生时, 必须立即采取措施。对少量泄露, 用合适的材料吸收, 或者用大量水冲洗, 将洗水稀释后进入废水系统; 若大量泄露, 应构筑围堰或挖孔收容, 用防爆泵及时转移, 回收处理。

当通过监测发现对周围地下水造成污染时, 根据监测井的反馈信息, 启动地下水污染事故应急处置抽水井, 对污染防治区地下水人工开采形成地下水漏斗, 控制污染区地下水流场, 阻滞污染物扩散。

### 4 结论

(1) 实验中粉质黏土对所取工厂废液  $COD_{Cr}$  的吸附和降解率比较低, 分别为  $0.263$  cm<sup>3</sup>/g、 $0.0101$  d<sup>-1</sup>; 工厂废液  $COD_{Cr}$  在包气带粉质黏土中的弥散度较低, 为 0.10 m, 说明该污水蓄水池场地包气带介质对废液中  $COD_{Cr}$  的天然防污性能不足, 若不采取任何防渗措施, 正常工况、非正常工况、一般事故和风险事故四种情形下, 污染物分别在 5.4 a、5 a、4.9 a、3.8 a 左右穿过 10 m 厚的包气带超标进入地下水造成污染。

(2) 如果铺设 2.5 m 的黏土层, 4 种情形下,  $COD_{Cr}$  从蓄水池底部迁移超标进入地下水所需要的时间分别延长到 12.2 a、10.5 a、9.1 a、6.8 a。

(3) 对于此类蓄水池对地下水污染风险的防控对策, 不仅要在蓄水池底部根据需要铺设适当厚度的黏性土垫层, 更要在加强与完善蓄水池设计、监控井设置以及风险事故应急

机制等方面。

参考文献(References) :

- [1] 吴子斌. PTA 工艺进展与污染控制[J]. 化学工程与装备, 2009 (9): 121-122. (WU Zr bin. PTA Technology progress and pollution control[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2008 (9): 121-122. (in Chinese))
- [2] 李振峰. PTA 工业废水的厌氧生物处理技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. (LI Zher feng. Study on treatment process of industrial PTA waste water by anaerobic microorganisms[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006(in Chinese))
- [3] Kumar A Y, Reddy M V. Assessment of Seasonal Effects of Municipal Sewage Pollution on the Water Quality of an Urban Canal—a Case Study of the Buckingham Canal at Kalpakkam (India): NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, BOD, COD and DO[J]. Environmental monitoring and assessment, 2009, 157(1-4): 223-234.
- [4] 朱欣华. 综合治理 PTA 装置废水 COD 污染[J]. 石油化工环境保护, 1994(1): 10-13. (ZHU Xir hua . Comprehensive treatment of the COD pollutant of the wastewater from PTA unit [J]. Environment Protection in Petrochemical Industry, 1994 (1): 10-13. ( in Chinese))
- [5] 刘长礼, 张云, 叶浩, 等. 包气带粘性土层的防污性能试验研究及其对地下水脆弱性评价的影响[J]. 地球学报, 2006 ( 4): 349-354. (LIU Chang li, ZHANG Yun, YE Hao, et al. Experimental studies of the filtration capability of clayey soils in the vadose zone and its influence on the evaluation of groundwater vulnerability to pollution[ J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006(4): 349-354. ( in Chinese))
- [6] 庞雅婕, 刘长礼, 王翠玲, 等. 某化工厂废液 COD (Cr) 在包气带中的迁移规律及数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2013(3): 24. ( PANG Ya jie, LIU Chang li, WANG Cuiling, et al. A study of the migration of factory pollutants CODCr in the vadose zone using numerical simulation methods[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013(3): 24. ( in Chinese))
- [7] 李玲玲. 龙口市平原区地下水污染风险评价研究[D]. 济南: 济南大学, 2010. (LI Ling-ling. The risk assessment study of groundwater contamination in Longkou plain area[D]. Jinan: Jinan University, 2010. ( in Chinese))
- [8] 江剑, 董殿伟, 杨冠宁, 等. 北京市海淀区地下水污染风险性评价[J]. 城市地质, 2010, 5(2): 14-18. (JIANG Jian, DONG Dian wei, YANG Guan ning, et al. Risk assessment of groundwater pollution of Haidian district of Beijing[ J]. Urban Geology, 2010, 5(2): 14-18. . ( in Chinese))
- [9] 李政红, 毕二平, 张胜, 等. 地下水污染健康风险评价方法[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(6): 47-51. (LI Zheng-hong , BI Er ping, ZHANG Sheng, et al. Method for health risk assessment of groundwater pollution[ J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(6): 47-51. ( in Chinese))
- [10] Van Genuchten, M T, F Leij, L Lund, Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. 1992, University of California, Riverside.
- [11] Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research, 1976. 12(3): 513- 522.
- [12] GB/T 14848-93. 中华人民共和国国家标准地下水质量标准 [S][D]. 1993. ( GB/T 14848-93. Quality standard for groundwater[S] [D]. 1993( in Chinese))
- [13] 王秀芹, 张玲, 王娟娟, 等. 高锰酸盐指数与化学需氧量(重铬酸盐法) 国标测定方法的比较[J]. 现代渔业信息, 2011, 26 ( 7): 19-20. ( WANG Xir qin, ZHANG Ling, WANG Juanjuan, et al. Comparison of international measure method between COD Mn and COD Cr[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(7): 19-20. (in Chinese))
- [14] 刘长礼, 张云. 上海浦东表层粘性土对城市垃圾污染质的阻隔能力[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 360-364. (LIU Chang-li, ZHANG Yun. The capacity of clayey soil liner at surface layer for obstructing garbage pollutant in Pudong area, Shanghai [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2001, 22(4): 360-364. (in Chinese))
- [15] 樊国强, 周长松. 包气带粘性土层防污性能研究[J]. 地下水, 2012 (4): 36-39. ( FAN Guo qiang, ZHOU Chang song. Study of antifouling property of the clay soil[J]. Groundwater, 2012 (4): 36-39. ( in Chinese))
- [16] 刘长礼, 张云, 叶浩, 等. 包气带粘性土层的防污性能试验研究及其对地下水脆弱性评价的影响[J]. 地球学报, 2006(4): 349-354. (LIU Chang li, ZHANG Yun, YE Hao, et al. Experimental studies of the filtration capability of clayey soils in the vadose zone and its influence on the evaluation of groundwater vulnerability to pollution[ J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006 (4): 349-354. ( in Chinese))
- [17] 刘长礼, 王秀艳. 城市垃圾卫生填埋场粘性土衬垫的截污容量及其研究意义[J]. 地质论评, 2000, 46 ( 1): 79-85. (LIU Chang li, WANG Xir yan, ZHANG Yun, et al. Filtration capability of clayey soil liner for garbage sanitary burial fields and its significance[ J]. Geological Review, 2000, 46(1): 79-85. (in Chinese))
- [18] 裴丽欣. 粘性土的不同特征对多环芳烃阻隔能力影响研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2011. ( PEI Lixin. Blocking ability analysis for cohesive soil of different characteristics to PAHs [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese))