

沈抚灌区石油污染土壤恢复方案的数值模拟

郑西来¹ 邱汉学¹ 荆 静² 刘贯群¹ 陈友媛¹

(1. 青岛海洋大学地球科学学院, 青岛 266003; 2. 青岛海洋大学职业技术学院, 青岛 266003)

摘要: 在沈抚灌区野外调查和室内外试验的基础上, 建立水分—反应性石油污染物运移的耦合数学模型, 采用数值方法模拟可溶性油(有效油)的分布规律, 并定量分析了石油污染土壤不同恢复方案的可行性. 研究表明, 土壤中的化学作用使可溶性油运移速度远远小于土壤水的入渗速度, 所以可溶性油主要分布在土壤耕作层之内, 难以通过灌溉污水的入渗直接污染地下水; 另外, 清污混合灌溉和改变作物结构的控制方案虽然可以大大降低土壤中可溶性油的含量, 但石油污染土壤的彻底恢复还必须依靠地表水或地下水的合理灌溉.

关键词: 可溶性油; 恢复方案; 耦合模型; 石油污染土壤.

中图分类号: X74; P641.76 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)05-0462-05

作者简介: 郑西来, 男, 教授, 1959年生, 1997年毕业于西安工程学院, 获博士学位, 现主要从事地下水污染控制的教学和研究工作.

0 引言

沈抚灌区是我国最大的石油污水灌区之一, 有四五十年的污灌历史. 在长期的污水灌溉条件下, 污水表面粘附的浮油会通过反复的耕作使耕作层中含油量大大增加, 而污水中的可溶性油会随着灌溉渗入地下, 同时被农作物吸收, 从而使粮食产生严重的石油污染, 甚至产生致癌致畸物质, 所以灌区石油污染的控制和恢复是一个重要的研究课题^[1~3]. 污染土壤中的石油包括残留油和可溶性油, 其中的残留油很难随水分一起运动, 也不容易被农作物所吸收, 所以土—水系统的有效石油污染物是其中的可溶性油. 但是, 目前采用的土壤取样和测定方法很难把总油和可溶性油区分开^[4], 因此无法直接评价可溶性油对土—水系统的实际污染程度. 数学模拟方法能够把土壤中水分—溶质的动力学过程和化学作用有机地结合起来, 定量研究不同条件下可溶性油的动态变化规律, 并进一步分析和验证各种恢复方案的可行性^[5~6]①.

1 沈抚灌区的环境概况

1.1 自然地理特征

沈抚灌区位于沈阳市和抚顺市之间, 1960年开始修建, 干渠全长约70 km, 使全灌区的污灌面积由几百 hm^2 扩大到 $1 \times 10^4 \text{ hm}^2$. 1973年又修建了东陵支渠, 污灌面积进一步扩大到 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$. 本区属于季风影响的湿润—半温暖温带大陆性气候, 年平均气温 $6 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$, 年均降雨量为 $650 \sim 800 \text{ mm}$, 年蒸发强度为 1440 mm , 冬季最低气温可达 $-32 \text{ }^\circ\text{C}$, 土壤冻层深达 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$. 沈抚灌区位于浑河南岸的浑河一级阶地上, 地面平坦. 阶地具有明显的二元结构, 下部为砂砾(卵)石层, 局部夹有粘土, 组成浅层孔隙含水层, 厚度 $60 \sim 80 \text{ m}$, 地下水埋深为 $9 \sim 40 \text{ m}$, 单井涌水量为 3000 t/d 以上; 上部由大面积黄土状物质组成, 质地均匀, 厚度 $5 \sim 15 \text{ m}$. 但李石寨以北的一级阶地是由砂土组成基底, 表层为 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 的壤质草甸土, 地下水位埋深 $1 \sim 2 \text{ m}$.

1.2 灌溉用水的水量和水质

沈抚灌区污水主要水质是抚顺市石油裂解工业污水, 其次是其他工业排水和生活污水. 据统计, 每天进入沈抚灌区的污水为 260000 t , 其中抚顺石油一、二、三厂的含油废水约占 64% , 污水中总油质量浓度为 $34.75 \sim 61.44 \text{ mg/L}$, 分别超过灌溉用水标

收稿日期: 2000-05-16

基金项目: 湖北省废物地质处置与环境保护重点实验室开放基金; 教育部骨干教师基金.

①Rorber S K. One-dimensional water and chemical movement in unsaturated soils. New York: Research and Development, EPA/600/8-89/076, 1989. 1~102.

表 1 土壤的组成和主要特征
Table 1 Composition and major characteristics of soils

取样位置	代号	取样范围/cm	土壤机械组成/%						pH	有机质/ 10 ⁻³	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度	土壤质地
			<0.001 mm	0.001~ 0.005 mm	0.005~ 0.010 mm	0.010~ 0.050 mm	0.050~ 0.250 mm	>0.250 mm					
李石寨	L2-1	0~30	7.80	8.40	6.40	33.88	23.60	20.92	6.25	40.18	1.38	0.479	壤土
四方台	S1-1	0~25	11.78	13.43	9.92	50.23	9.56	5.08	5.55	74.02	1.32	0.502	粉砂质粘壤土
兴农	X1-1	0~35	8.93	14.74	7.06	56.89	11.07	1.31	5.25	21.66	1.33	0.498	粉砂质粘壤土

准 3~6 倍;可溶性油的平均质量浓度约为 9.27 mg/L,超过饮用水标准近 200 倍.在 5—9 月份的灌溉季节,由三宝屯的总提水站分入沈抚干渠和李石干渠,然后经各灌渠提水站自流灌溉.

1.3 石油污染状况

考虑到本区石油污染的历史和土壤的岩性组成的差异,分别采集和测定了污灌 40~50 a 的上游地区(李石寨、四方台)和污灌 30~40 a 的中游地区(兴农)土壤的机械组成和主要特征(表 1).

将污水灌区(李石寨、四方台、兴农)和清水灌区稻米中含油量相对比,含油量增加了 13.6%~64.7%,说明污水灌区的水稻在吸收水分的同时,也吸收了可溶性油分,使污灌区粮食的品质下降.

沈抚灌区的上游李石寨地区,表层土壤厚度仅为 30~40 cm,且李石干渠和沈抚干渠都是直接座落在砂层之上,导致干渠和支渠两侧(特别是沿地下水流向一侧)地下水产生石油污染,一般影响范围在 10~30 m 之内.在灌区的中下游地区,地下水埋深一般超过 20 m,且上覆的粘质盖层厚,透水性差,所以该区污灌渠两侧地下水水质没有明显的变化.

2 数学模型及其解法

反应性石油污染物运移模型是由土壤水分和土壤溶质运移两个部分组成.在描述室内土柱和田间比较均质土壤中水分运动时,采用的水分运移模型可以表示为

$$\begin{cases} B(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h)\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right]; & (1) \\ h(z,0) = h_0, 0 < z < L; & (2) \\ h(0,t) = h_s, t > 0; & (3) \\ h(L,t) = h_L, t > 0. & (4) \end{cases}$$

式中: t 为时间; z 为土壤深度方向的坐标,取向为下为正; $k(h)$ 是负压为 h 时的导水率; $B(h) = dh/d\theta$ 为比

水容度; θ 为体积含水量; h_0 为初始负压值; h_s 和 h_L 分别为地表和深度为 L 时的负压值.

石油污染物为反应性物质,在土—水系统运移的定解问题可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\theta R_1 c) = \frac{\partial}{\partial z}\left[\theta D \frac{\partial c}{\partial z} - qc\right] - (\alpha\theta + \beta\rho K_d)c; & (5) \\ c(z,0) = c_0, 0 < z < L; & (6) \\ -\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + q(0,t)c = q(0,t)c_s, & (7) \\ q(0,t) > 0; & (7) \\ \frac{\partial c}{\partial z} = 0, z = L. & (8) \end{cases}$$

式中: ρ 为土壤容重; K_d 为固相和液相之间的分配系数; $R_1 = \rho K_d / \theta$ 是土壤对溶质迁移的阻滞系数; c 为液体中溶质浓度; α 为液相中溶质的一阶降解常数; β 为固相中溶质的一阶降解常数; D 为非饱和土壤的弥散系数; c_0 和 c_s 分别为初始浓度和地面渗入或蒸发($c_s = 0$)水分中的含油量.

为了研究污水灌区土壤中可溶性油的迁移—转化规律,分别测定了 L2-1, S1-1 和 X1-1 的水—盐动力学参数^[7,8](见表 1),其中非饱和土壤中溶质的弥散系数(D)采用 Millington-Quirk 公式计算^[9],即

$$D = 7.02 \times 10^{-5} \theta^{10/3} + \eta |V(z,t)|. \quad (9)$$

式中: η 为弥散度.而土壤导水率 $k(h)$ 可采用 VG—Mualem 模型,并通过优化拟合方法求解各系数值^[10],即

$$k(h) = K_s \frac{1 - (a|h|^{b-1} [1 + a|h|^b])^{-m^2}}{[1 + (a|h|^2)]^{m/2}}. \quad (10)$$

其中: K_s 是渗透系数; a, b 为系数,且 $m = 1 - 1/b$.
本文采用有限差分法对土壤水分运移模型和反应性溶质运移模型进行离散化,取步长 $\Delta z = 1$ cm, $\Delta t = 0.005$ h.另外,通过模型检验,土柱下端水分和可溶性油通量的实测值与计算机模拟值非常接近,

表 2 土壤水分—溶质的动力学参数

Table 2 Hydrodynamic parameters of water-solute in soils

参数名称	L2-1	S1-1	X1-1
渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.91	0.54	1.37
分配系数(-)	25.63	39.15	12.06
固相降解系数/($1 \cdot \text{h}^{-1}$)	4.0×10^{-5}	7.0×10^{-5}	4.0×10^{-4}
水相降解系数/($1 \cdot \text{h}^{-1}$)	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
弥散度/cm	0.60	0.39	0.37
系数 a	0.003 5	0.004 5	0.004 3
系数 b	2.10	2.15	2.04

说明数值模型和实测参数是可靠的。

3 土壤水分和可溶性油的分布规律

3.1 土壤水分分布

沈抚灌区 95% 以上的农作物为水稻,采用大田漫灌,整个生长期约灌水 10 次(包括大气降雨),每次灌溉量为 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,但插秧前的泡田用水量约为 $2250 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。若不考虑稻田地表水层的影响,取地表为饱和含水量,由水分运移模型和已知参数可以计算土壤中水分分布,如图 1a 所示。图中竖线为土壤初始含水量,向一端收敛的曲线分别为灌溉不

同时间的水分分布状况。

3.2 土壤中可溶性油的分布

根据田间污水水质分析,污水中可溶性油平均质量浓度为 9.27 mg/L ,根据实测的水分—溶质动力学参数,把水分和溶质运移模型耦合起来,计算土壤中可溶性油的分布,如图 1b 所示。对比水分分布和可溶性油的分布曲线可以看出,随着污灌量的增加,可溶性油入渗逢面的深度不断地增加,但土壤中可溶性油的运移速度比水分慢得多,说明土壤中的化学作用对可溶性油的运移有明显的阻滞作用。

4 土—水系统石油污染的调控

根据土壤中可溶性油分布规律,尽管土壤中可溶性油主要分布在耕作层内,不能直接污染地下水,但它仍能够被农作物所吸收,所以必须要采取各种措施降低或消除土壤中石油污染。

4.1 清污混合灌溉

根据水质监测结果,灌溉污水中含油量较高,但大部分为浮油,可溶性油质量浓度一般不超过 10 mg/L ,所以要把提水站的泵头放在深水处,避开浮

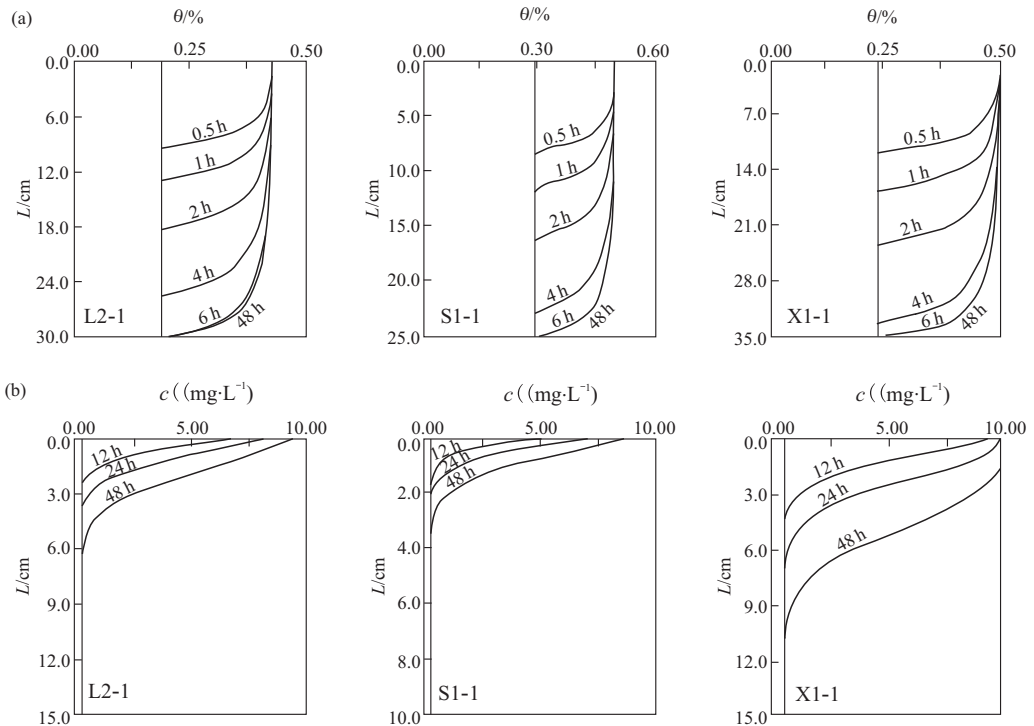


图 1 土壤中水分和可溶性油的分布

Fig. 1 Distribution of water and aqueous oil in soils

θ . 体积含水量; c . 含油量

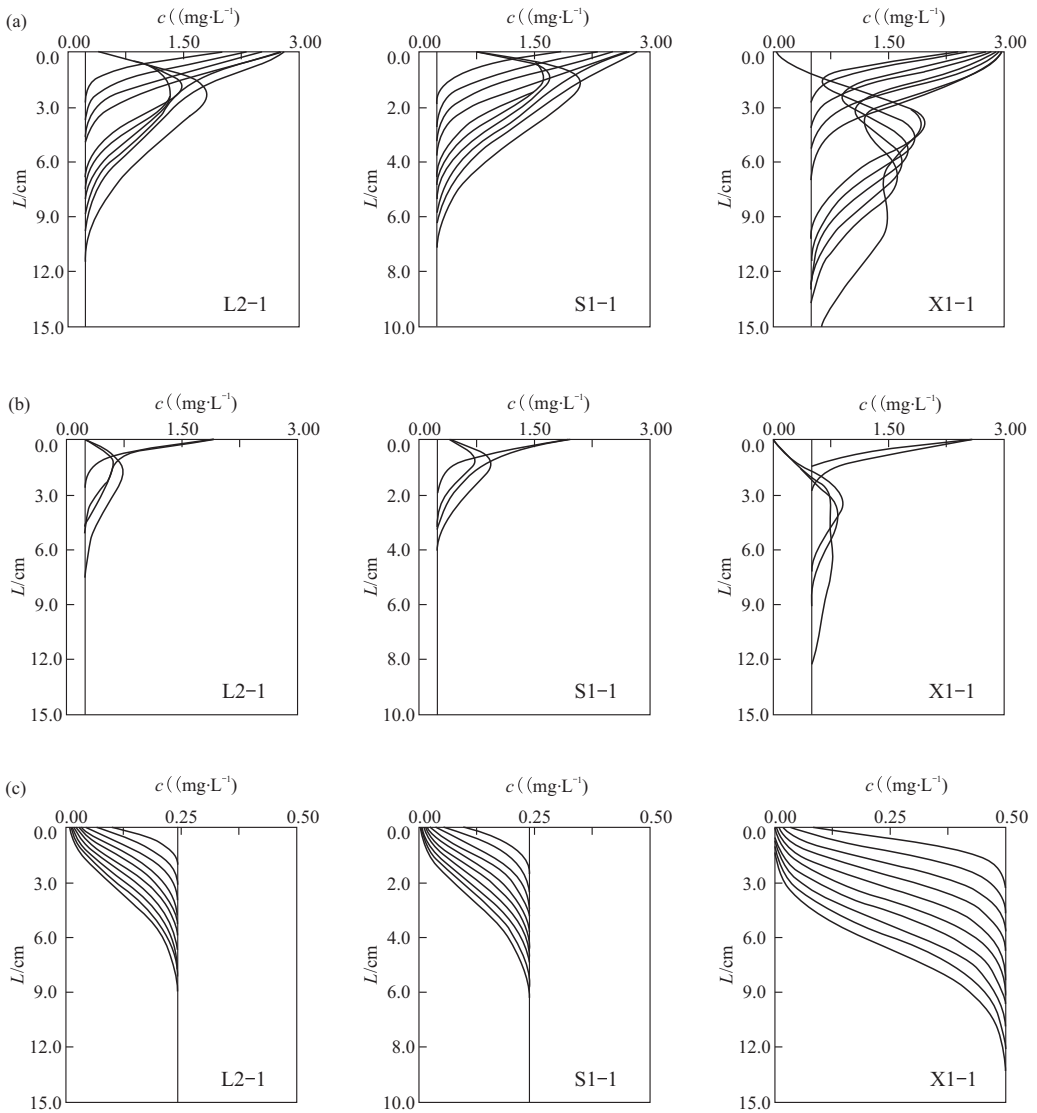


图 2 不同控制条件下土壤中可溶性油分布

Fig. 2 Distribution of aqueous oil in soils under different control conditions

油进入干渠. 另外,在不改变当前灌溉量和作物结构的前提下,可以采用清污混合灌溉,若按清污混合比为 3 : 1,则灌溉用水中油质量浓度约为 3 mg/L. 这种情况下,按水稻生长期污灌 8 次(每次 900 m³/hm²)和降雨 2 次,降雨强度均为 0.5 cm/h,并持续 24 h(假定在第 4 次和第 8 次污灌后),则溶解油分布如图 2a 所示.

这 3 张图中可溶性油的分布形态基本相似,上面 4 条向右上角收敛的曲线是前 4 次污水灌溉后土壤中可溶性油的分布曲线,又经过 24 h 降雨后,地表土壤中可溶性油质量浓度大大降低,并使其锋面有所下移. 在此基础上形成的 4 条近平行的分布曲线,是后 4 次污水灌溉的结果,而最后一次降雨使土

壤中可溶性油锋面进一步下移.

在这种调制方案下,土壤 X1-1 中可溶性油质量浓度低于 2.00 mg/L,而土壤 L2-1 和 S1-1 中溶解油质量浓度大都低于 1.50 mg/L,大大降低了土壤中可溶性油的含量,从而可以缓解石油对农作物的影响.

4.2 改变农作物结构

在沈抚灌区种植水稻,需要灌溉量很大,采用含油污水灌溉又使土壤中含有可溶性油分,并使其在植物体中富集,使稻米质量下降. 将种植水稻改为耐旱的作物(例如小麦、大豆等),在天然条件下一年灌溉两次就可以基本满足要求. 假定两次污灌量均为 900 m³/hm²,且第一次和第二次污灌后都有一次 24

h(0.5 cm/h)的降雨,土壤中可溶性油分布如图 2b 所示.在这种调控方案下,土壤中可溶性油质量浓度可以控制在0.75 mg/L以下,但这种方案仍然不可能彻底消除农作物污染.

4.3 地表或地下水灌溉

从长远观点看,不但要逐步消除污水灌溉,而且要使污染的土壤逐渐得到恢复,从而从根本上改变该区的农业环境质量.在目前的污灌条件下,土壤 L2-1, S1-1 和 X1-1 中可溶性油的质量浓度分别为 0.23 mg/L, 0.24 mg/L, 0.79 mg/L, 若采用清洁的地表水或地下水进行灌溉,每年降雨和清水灌溉 10 次,每次 900 m³/hm²,则土壤中可溶性油的恢复情况如图 2c 所示.在这种情况下,土壤中可溶性油质量浓度逐渐降低,从而使污染的土壤不断地得到恢复,也不需要其他专门的治理措施,所以采用地表水或地下水灌溉是最终彻底消除沈抚灌区土-水-作物系统石油污染的根本出路.

沈抚灌区位于浑河南岸的一级阶地上,在近岸地带可以引用地表水种植水稻,而远离河流的地方可以开采地下水种植一些比较耐旱作物.这样,既保证本区水资源的合理利用,又避免了水-土-作物系统的石油污染.

参考文献:

- [1] 高拯民. 土壤-植物系统污染生态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986. 1~13.
- [2] 刘期松, 杨桂芬. 石油污染区微生物生态及其降解石油的研究[J]. 环境科学, 1981, 12(3): 1~3.
- [3] Fetter C W. Contaminated hydrogeology [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1992. 33~89.
- [4] 谢重阁. 环境中石油污染物的分析技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 66~95.
- [5] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 52~77.
- [6] Nielsen D R, Van G M, Biggar J W. Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone [J]. Water Resour Res, 1986, 22(9): 89~108.
- [7] 刘孝义, 依艳丽. 土壤物理学基础及其研究方法[M]. 辽宁: 东北大学出版社, 1998. 61~79.
- [8] 郑西来, 刘孝义, 席临平. 地下水石油污染物的迁移与相间转移[J]. 长春科技大学学报, 1998, (1): 52~55.
- [9] Millington R J, Quirk J P. Permeability of porous transport [J]. Faraday Soc, 1961, 57(6): 1200~1207.
- [10] Van G M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44(5): 892~898.

NUMERICAL MODELING ON ELIMINATION OF OIL-POLLUTED SOILS IN SHENYANG-FUSHUN IRRIGATION AREA

Zheng Xilai¹ Qiu Hanxue¹ Jing Jing² Liu Guanqun¹ Chen Youyuan¹

(1. Institute of Geosciences, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China; 2. Institute of Professional Technique, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China)

Abstract: In this paper, a coupling mathematical model of the moisture-reactive petroleum pollutant migration is established on the bases of field investigation and indoor and outdoor tests in Shenyang-Fushun irrigation area. In this model, the numerical method is first used to simulate the distribution pattern of the soluble oil (effective oil) and to analyze quantitatively the feasibilities of different restoration projects for the oil-polluted soils. The research results show that the chemical reaction in the soil may lower the migration speed of the soluble oil far less than the penetration speed of the soil water. Therefore, the soluble oil is mainly distributed in the ploughed soil layer, making it difficult to pollute directly the groundwater by the penetration of the polluted water for irrigation. In addition, the controlling plans of the irrigation by the mixed clean and polluted water and of the change in the crop structures may greatly reduce the soluble oil concentration in the soil, but the complete elimination of the oil-polluted soil must depend on the reasonable irrigation by the surface water or/and groundwater.

Key words: soluble oil; controlling plan; coupling model; oil-polluted soil.