

陕西交口灌区地下水防铬砷污染安全埋深的探讨

易 秀, 李佩成

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 在提出关于“地下水防污安全埋深”定义的基础上, 以陕西交口抽渭灌区为例, 将灌区灌溉水、土壤层和地下水视为水-土-水系统进行了整体研究, 并把理论研究成果与灌区的实际状况相结合, 从铬和砷在土壤中迁移转化及其净化的机理出发, 通过选择耕作层下渗水量的水流运动模型、铬和砷在耕作层及包气带土壤层迁移转化的模型, 根据灌区的实际勘察和野外试验结果确定了不同模型的相关参数, 分别以灌溉水的实测浓度及拟设的其他不同浓度进行了耦合计算。结果表明, 在黄土灌区, 当灌溉水中铬和砷浓度不大于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下, 防止地下水铬和砷污染的安全埋深分别为不小于 5.0 m 和 1.5 m , 为灌区制定防止水土资源污染的有效措施提供了依据。

关键词: 陕西交口灌区; 地下水; 铬; 砷; 安全埋深

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2005)02-0333-04

Safely Buried Depth for Protection of Groundwater from Pollution of Cr and As at Jiaokou Irrigation Area in Shaanxi Province

YI Xiu, LI Pei-cheng

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Jiaokou irrigation area in Shaanxi Province utilizes Wei River as its water source for farming. In recent years, as extension of cities and industries in the region, Wei River has been polluted seriously. As the water source for irrigation, Wei River has an important influence on ecological environment and the quality of groundwater in the area. In order to lessen harm of polluting water irrigation to soil and groundwater, it is important to put forward efficiency measures to prevent soil and groundwater from pollution. As to the definition of Safely Buried Depth of protecting groundwater from pollution, it is the given buried depth from groundwater table to surface. The soil layer in this depth can ensure that harmful elements are purified when polluted surface water seeps into it, and groundwater is not polluted. Determining the Safely Buried Depth of protecting groundwater from polluting is a critical problem that needs considering comprehensive factors. Taking with Jiaokou irrigation area in Shaanxi as example, the integral researches are carried out by regarding irrigation water, soil and groundwater as surface water-soil-groundwater system. The theoretical research results combine with present conditions of irrigation area. Proceeding from mechanism that Cr and As migration, transformation and purification in the soil, the coupling calculated results are concluded by choosing cultivated horizon model of water flow movement and aeration zone model of Cr and As migration and transformation in cultivated and aeration horizons, determining the parameters of different models according to survey and field experiment results, and using actual analyzed and given concentrations, respectively. The results indicated that in loess area, when concentrations of Cr and As are less than $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in sewage infiltration fluid, the purification depths of Cr is 5.0 m , and that of As is 1.5 m in loessial soil. For irrigation area, if the concentration of Cr for irrigation water is $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, after irrigating continuously 20 d, the concentration of infiltration water that flow from cultivated horizon below 1.5 m , exceeding the drink water official standard; and below 5.0 m , it needs 80 d above. For As, if the concentration is $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, even though irrigating continuously 300 d, the concentration of infiltration water that flow from cultivated horizon below 0.5 m , not exceeding the standard. When concentrations of Cr and As are $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, after irrigating continuously 20 d for Cr and 150 d for As, the concentrations of infiltration water below 0.25 m , just surpassing the standard. According to real conditions in loess irrigation area, the concentrations of Cr and As are far less than the given concentrations in researches, and the same time a part of accumulating Cr and As in soil may be absorbed by the roots of plants. The results can be reached by composite studies that the Safely Buried Depth of preventing groundwater from being polluted by Cr and As in loess irrigation area are not less than 5.0 m and 1.5 m under conditions that concentrations of Cr and As in irrigation water are less than $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Keywords: Jiaokou irrigation area in Shaanxi; groundwater; Cr and As; safely buried depth

收稿日期: 2004-06-21

基金项目: 国家科技攻关计划项目资助(2002BA901A43); 长安大学科技发展基金项目资助(04Z08)

作者简介: 易秀(1965—), 女, 青海西宁人, 副教授, 博士, 主要从事土壤与水资源污染防治的教学与科研工作。E-mail: xa_yixiu@163.com

陕西交口抽渭灌区位于陕西省关中东部的渭河北地地域,灌区面积约 1 500 km²。交口抽渭灌溉工程始建于 1960 年,它以渭河水为灌溉水源,灌溉面积 7.98 万 hm²。

随着城市及工业的发展,渭河沿途污染源增多,污染物排放量加大,河水受到严重污染。因此渭河作为灌溉水源对灌区生态环境和地下水水质产生了重大影响^[1-3]。为了减轻渭河污染水灌溉对土壤和地下水资源的危害,提出防止灌区水土资源污染的有效措施十分重要。本项研究将灌溉水、土壤层和地下水视为水-土-水系统进行整体研究,把理论研究成果与灌区实际状况相结合,通过选择适宜的模型进行耦合计算,提出了黄土灌区地下水防污染的安全埋深。

关于“地下水防污安全埋深”的定义,作者研究认为应当是地下水水面距地面的特定埋藏深度,该深度包含的土层厚度能够确保受污染的地面水源渗经土层时,有害元素在其范围内能够得到净化,而使地下水在接受地面水补给时不会遭受污染的埋藏深度。确定地下水防污安全埋深是一个需要考虑综合因素的深化研究的课题。在本项研究中,主要是从铬和砷迁移转化的机理出发,着重探讨灌溉条件下防止铬和砷污染地下水的防污安全埋深问题。

1 铬和砷在耕作层中的迁移模型

从研究污染物在土壤中垂向迁移转化规律、保护地下水资源的角度出发,本研究中将土壤由上而下分为耕作层、犁底层(厚约 6~8 cm)、下包气带土壤层。耕作层指地表下 0~20 cm 内的土壤,由于作物根系生长,土质疏松,有机质含量高,微生物发育好,使得污染物在其中发生复杂的物理、化学和生物作用。

在农田生态环境中,污染物质来源广,分布范围大。因而农田生态系统的一些复杂变化使其与外部环境的物质和能量交换难以精确描述。从农田生态环境的整体出发,人们所关心的是污染物质的输入与输出对环境的影响,因此可采用黑箱模型^[4]来描述污染物质在农田生态环境系统中的迁移转化规律。

1.1 计算耕作层下渗水量的水流运动模型

灌溉期间,表土层中的作物吸收和水分蒸发等因素会引起水分损失,由于影响因素复杂,可认为水分损失与灌溉时间成正比;同时,会有大量水分滞留于土壤空隙中,滞留量与土壤空隙率、饱和含水率和土壤质地等因素有关。对耕作层的灌水进行衡算,可得到水流运动模型:

$$q_1 = K \cdot F \cdot t_1 = q_0 - aV - bt_1 \quad (1)$$

式中: q_0 为作物生长期间每 667 m² 的农田灌水量, m³; q_1 为作物生长期间每 667 m² 农田渗入下包气带的水量, m³; F 为每 667 m² 农田的表面积, m²; t_1 为每年污灌时间, d; K 为犁底层渗透系数, m · d⁻¹; a 为田间持水量,通常在 25%~35% 之间^[5]; b 为作物生长期间平均水分损失系数, m³ · d⁻¹; V 为每 667 m² 农田耕作层土壤总体积, m³。

1.2 计算铬、砷从耕作层渗入包气带土壤层的污染物迁移模型

耕作层中由于受土壤微生物及光化学等作用,有机污染物能够得到充分降解,但对于生物难降解的重金属污染物铬和砷,灌溉期间的降解作用可以忽略。通过对耕作层土壤中污染物的物料衡算,得到铬和砷在耕作层中的迁移模型:

$$C_1 q_1 = C_0 q_0 - (C_p W_p - S W_s) / 1\,000 \quad (2)$$

式中: C_0 、 C_1 为灌溉水和耕作层下渗水中污染物浓度, g · m⁻³; S 为土壤中污染物的吸附量, mg · kg⁻¹; C_p 为作物中污染物的含量, mg · kg⁻¹; W_p 为每 667 m² 农田作物的产量, kg; W_s 为每 667 m² 农田耕作层土重, kg, 取 150 000 kg; 其余参数同式(1)。

当土壤吸附达饱和后,式(2)变为:

$$C_1 q_1 = C_0 q_0 - (C_p W_p) / 1\,000 \quad (3)$$

2 铬和砷在包气带土壤中迁移转化的模型

假定下包气带土壤为均匀的多孔介质,水流为稳定条件,把污染源看作是面源,考虑推流、弥散及污染物与土壤介质的吸附-解吸作用和污染物浓度不很高时,则铬和砷的迁移转化可选用一维纵向模型,即:

$$\begin{cases} R_d \frac{\partial C_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_2}{\partial Z^2} - V \frac{\partial C_2}{\partial Z} \\ R_d = 1 + \frac{\rho}{n} \cdot K_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_d 为迟滞因子; C_2 为由下包气带渗入地下水中污染物的浓度, mg · L⁻¹; t 为时间, d; D 为污染物在土壤中的纵向弥散系数, m² · d⁻¹; z 为耕作层以下纵向深度, m; V 为实际渗透流速, m · d⁻¹; ρ 为土壤干容重, g · cm⁻³; n 为土壤有效孔隙度, %; K_d 为吸附分配系数, L · kg⁻¹ 或 mL · g⁻¹。针对交口灌区的实际情况,提出如下边界和初始条件。

$$\text{初始条件: } C_2(z, t) |_{t=0} = 0, 0 \leq z < \infty \quad (5)$$

$$\text{边界条件: } C_2(z, t) |_{z=0} = C_1, 0 \leq t < \infty \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial z} = 0, 0 \leq z < \infty, 0 \leq t < \infty \quad (7)$$

水流在下包气带运动假定处于定常状态,其值等于 q_1 。基本方程(4)为一维迁移模型,给定初始条件和边界条件即可用数值解也可以用解析解计算^[6],均无数学上的困难,本研究采用解析解。

在选择模型的基础上,将耕作层的黑箱模型和下包气带土壤一维纵向弥散模型耦合,来计算铬和砷从地表随入渗液经过耕层和下包气带而进入含水层的浓度。整体模型的联接如框图 1。

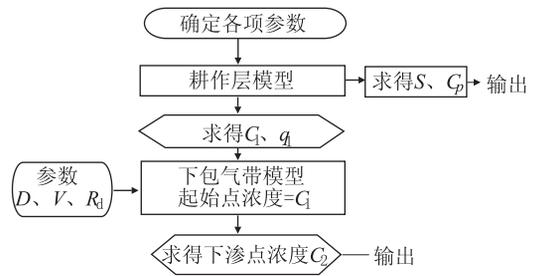


图 1 整体模型联接框图

Figure 1 Frame map of the integral model used in the present study

灌区灌溉水源为渭河水,在夏冬两季采集水样进行水质分析,结果分别见表 2。

3 以陕西交口灌区为例进行模型求算

3.1 灌区土壤基本性质及灌溉水质

灌区土壤主要为黄土母质发育的农业土壤—塿土土类。其理化性质如表 1。

3.2 不同模型的参数确定

灌区黄土不同土层中铬、砷的吸附适合朗格缪

表 1 陕西交口灌区耕层土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of cultivated soil in Shaanxi Jiaokou irrigation area

项目	机械组成		容重 /g · cm ⁻³	孔隙度 /%	有机质 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	pH	总砷 /mg · kg ⁻¹	总铬 /mg · kg ⁻¹
	<0.01 mm/%	<0.002 mm/%								
含量	45.6	11.2	1.23	53.4	8.5	0.38	0.63	8.5	15.4	54.2

表 2 灌区灌溉水夏季和冬季采样测定结果(mg · L⁻¹)

Table 2 As and Cr contents for irrigation water sampled in spring and winter(mg · L⁻¹)

采样时间	项目	采样断面				固市	农田灌溉水质标准 (GB5084-85)
		渭河西楼	田市总干渠	上张渡	辛市		
夏季	砷(As)	0.005	0.024	—	—	—	≤0.05
	六价铬(Cr ⁶⁺)	0.004	0.007	—	—	—	≤0.1
冬季	砷(As)	未检出	—	0.050	0.036	未检出	≤0.05
	六价铬(Cr ⁶⁺)	0.022	—	0.005	0.015	未检出	≤0.1

注:“—”表示未测定。

(Langmuir)模式,即:

$$S = \frac{K_d C}{1 + FC} \quad (8)$$

式中: S 为土壤中污染物的吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; C 为平衡液中污染物浓度, $mg \cdot L^{-1}$; K_d 为污染物的分配系数; F 为常数。根据铬和砷在塿土中的吸附试验结果^[7],可求得铬和砷在塿土各土层的 K_d 值,表 3,在包气带土壤模型中选取的 K_d 为平均值。

灌区耕作层模型和下包气带模型的其他参数通过实际勘察和野外试验并参考有关文献确定,表 4 和 5。

3.3 求算结果

根据表 4 提供的参数,由式(3)计算出在灌区作

表 3 塿土不同土层铬和砷的吸附分配系数(L · kg⁻¹)

Table 3 Adsorption distribution coefficients for Cr and As in different Lou soil horizon (L · kg⁻¹)

污染物	不同土层				平均
	耕层	犁底层+老耕层	粘化层	钙积层	
Cr	0.685	0.794	0.990	0.526	0.749
As	24.9	28.1	47.5	38.9	34.9

物生长期间,每 667 m² 农田灌水量为 200 m³ 时,农田渗入下包气带的水量 q_1 为 118 m³。

为了比较用铬和砷含量不同的水灌溉后对地下水的的影响,在计算 C_1 、 C_2 时,对 C_0 的选取除了实测值外,还拟设不同的 C_0 值进行预测,模型求算结果见

表 4 耕作层模型参数

Table 4 The parameters for the cultivated horizon model

q_0 /m ³	α /%	V /m ³	$b/m^3 \cdot d^{-1}$ *		t_1 /d	$C_p / mg \cdot kg^{-1}$ **				W_p / kg		$K_d / L \cdot kg^{-1}$	
			小麦	玉米		小麦 Cr	小麦 As	玉米 Cr	玉米 As	小麦	玉米	Cr	As
200	30	133.4	1.37	3.94	8	0.167	0.064	0.156	0.046	200	300	0.685	24.9

注: * 引用文献[8]; ** 文献[9]。

表5 包气带模型参数

Table 5 The parameters for aeration zone model

n	ρ /g·cm ⁻³	V* /m·d ⁻¹	D** /m ² ·d ⁻¹	K _a /L·kg ⁻¹	
				Cr	As
0.23	1.28	0.298	5.04 × 10 ⁻³	0.749	34.9

注: *引用文献[1]; **参考文献[10]、[11]的类比数据。

表6、7和8。对陕西交口灌区的调查表明,地下水的平均埋深为6.4 m。计算结果发现,要使铬和砷迁移到包气带6 m以下则需要很长的时间,因此交口灌区在目前的灌溉条件下,不会对地下水产生影响。

4 分析与结论

研究结果^[7]已得出,在黄土地区,当污水淋入液铬和砷的浓度皆小于10.0 mg·L⁻¹时,土层5 m深度

表6 耕作层下渗水中铬和砷计算浓度 C₁值(mg·L⁻¹)Table 6 Concentrations C₁ for Cr and As in infiltration water in the cultivated horizon (mg·L⁻¹)

Cr		实测值		农灌标准		拟设值	
		C ₀	0.014	0.1	1.0	10.0	
	C ₁	0.012	0.090	0.906	9.06		
As		实测值		农灌标准		拟设值	
		C ₀	0.024	0.1	1.0	10.0	
	C ₁	0.001	0.005	0.052	0.519		

注:实测值为取不同季节2次测定结果的平均值。

表7 不同时间和不同深度包气带下渗水中铬计算浓度 C₂值Table 7 Concentration C₂ for Cr in infiltration water of aeration zone at different times and depths

时空分布	耕作层下渗水中铬计算浓度 C ₁ /mg·L ⁻¹			
		0.012	0.090	0.906
z = 1.5 m t = 20 d	0.001	0.032	0.082	0.812
z = 2.0 m t = 30 d	0.001	0.011	0.106	1.06
z = 5.0 m t = 70 d	0.000	0.000	0.004	0.036
z = 5.0 m t = 80 d	0.002	0.013	0.132	1.32

表8 不同时间和不同深度包气带下渗水中砷计算浓度 C₂值Table 8 Concentration C₂ for As in infiltration water of aeration zone at different times and depths

时空分布	耕作层下渗水中砷计算浓度 C ₁ /mg·L ⁻¹	
		0.052
z = 0.25 m t = 90 d	0.002	0.023
z = 0.25 m t = 150 d	0.019	0.186
z = 0.50 m t = 200 d	0.001	0.013
z = 0.50 m t = 300 d	0.017	0.169

可作为铬的净化深度,而砷的净化深度为1.5 m。表明当污染物为该浓度的情况下,在相应的土壤深度内,铬和砷完全可以被净化。对于灌区,所建立的黑箱模型和包气带土壤一维纵向模型计算的结果表明,假定灌溉水中铬浓度为1.0 mg·L⁻¹时,需要连续灌溉20 d后,在耕层以下1.5 m土层深度下渗水的浓度才会超出国家饮用水标准(0.05 mg·L⁻¹),在耕层以下5.0 m深度则需要80 d以上;对于砷,假定灌溉水中浓度为1.0 mg·L⁻¹,即使连续灌溉300 d,在耕层以下0.5 m土层深度的下渗水中砷浓度也未超标(0.05 mg·L⁻¹)。当灌溉水铬和砷浓度都达到10.0 mg·L⁻¹时,对于铬经过连续灌溉20 d,对于砷经过连续灌溉150 d时,耕层以下0.25 m土层深度下渗水中铬和砷浓度才会引起超标。从黄土灌区的实际情况来看,灌溉水中铬和砷的浓度远小于本研究中的拟设值,而且随灌溉水进入黄土层内积累的铬和砷,有一部分可能通过植物根系等的吸收而转移。

综上分析并结合室内外试验结果,可以得出:在黄土地区,当铬和砷浓度不大于10.0 mg·L⁻¹的情况下,防止灌区地下水铬和砷污染的安全埋深分别不小于5.0 m和1.5 m。

参考文献:

- [1] 李佩成,等. 黄土原灌区三水转化机理及调控研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1999.
- [2] 周维博,李佩成. 我国农田灌溉的水环境问题[J]. 水科学进展,2001,12(3):413-417.
- [3] 易秀. 农事活动对水资源的非点源污染问题[J]. 西安工程学院学报,2001,23(2):63-68.
- [4] 许秀元,陈同斌. 土壤中溶质运移模拟的理论与应用[J]. 地理研究,1998,17(1):99-106.
- [5] 周海红,张志杰,王士龙. 重金属在农田生态系统中迁移的建模研究[J]. 农业环境保护,2001,20(5):315-318.
- [6] 孙訥正. 地下水污染数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [7] 易秀. 黄土类土中铬砷的净化机理及防止地下水污染的安全埋深研究[D]. 西安:长安大学,2003.
- [8] 阮晓红,王超,朱亮. 氮在饱和土壤层中迁移转化特征研究[J]. 河海大学学报,1996,24(2):51-55.
- [9] 王永胜. 关中抽渭灌区农田非点源污染及水源保护研究[D]. 西安建筑科技大学,2000.
- [10] 刘兆昌,聂永丰,张兰生,等. 重金属污染物在下包气带饱水条件下迁移转化的研究[J]. 环境科学学报,1990,10(2):160-172.
- [11] 王超,阮晓红,朱亮. 水分及非保守性污染物在土壤中运移数值模拟[J]. 河海大学学报,1996,24(3):5-10.

致谢:参加研究工作的还有张益谦,周聪韧等,特此致谢。