重金属在农田生态系统中迁移的建模研究

周海红1,张志杰2,王士龙1

(1. 山东建材工业学院应化系环境教研室,山东 济南 250022;2. 西安建筑科技大学环境工程系,陕西 西安 710055)

摘 要: 对重金属在农田生态系统中的迁移机理进行了详尽介绍,并以此为基础提出一整体数学模型,推导出作物籽实中的重金属含量与灌溉水质、土壤性质、作物根系性质等参数间的定量关系。对陕西交口灌区的农田生态系统也进行了 模拟,所得到的模拟值与实测值之间吻合较好。

关键词:农田生态系统;数学模型;重金属

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 0267(2001)05 - 0315 - 04

Transfer Model of Heavy Metals in Agro-ecosystem

ZHOU Hai-hong¹, ZHANG Zhi-jie², WANG Shi-long¹

(1. Shandong Institute of building materials, Jinan 250022 China; 2. Dept. of Environment Engineering,

Xi'an Architecture Science-Technology University, Xi'an 710055 China)

Abstract: A mathematical model of heavy metals' transferring in agro – ecosystem was described. In addition, the relationships among irrigating water quality, soil properties, crop root parameters, heavy metal characters, and concentrations of heavy metals in seeds was deduced. Finally, the model was validated at the irrigation district of Jiaokou, Guanzhong area of Shaanxi Province. It has been indicated that the simulating value was well in line with the data from field test.

Keywords: agro-ecosystem; mathematical model; heavy metal

我国是一个干旱缺水较严重的国家,且水资源分 布极不均匀,无法满足农业用水的需要。1957年,农 业部把污水灌溉列入国家科研计划,大规模兴建灌溉 工程,节约水资源并减轻污水排放对环境的危害。农 牧渔业部于1976年—1982年间,普查了全国37个 污灌区,发现因土壤污染引起农产品中污染物超过卫 生标准或导致减产的地点达22个,地下水水质总体 来讲处于开始污染阶段。另外,我国在渭河、黄河、长 江流域建立了一些清灌区,近年来各河流中工业污水 排放量日益增加,河流污染也日趋严重,尤其重金属 污染已不容忽视。随着灌溉年限的发展,各清灌区同 样面临农田生态系统污染的危险。因此,预测重金属 在农田生态系统中的迁移有非常重要的意义。本文将 建立数学模型,来模拟、预测农田生态系统的污染趋 势。

1 农田生态系统构成及重金属在其中的迁移

重金属进入农田后,参与农田生态系统的物质循

基金项目:"九五"国家重点科技攻关项目(96-912-05-03-05)

环,根据其迁移途径,可将农田生态系统分为:水源、 农作物、土壤、地下水、农田退水5部分。其中,土壤可 进一步细分为:耕作层、下包气带、含水层,见图1。

重金属 Pb、Cd、Hg 进入农田生态系统后,大部分 积累于耕作层土壤中,易被作物吸收,很难向下包气 带迁移。而 Cr、As 则部分积累于耕作层,其余部分向 下包气带、含水层迁移,有可能污染地下水¹¹¹。

2 数学模型的建立

2.1 重金属在耕作层中的迁移

收稿日期: 2000-12-04

作者简介:周海红(1973一),男,硕士,山东建材工业学院应化系,从 事环境微生物及废水生物处理领域研究。

耕作层指地表下 0—20 cm 内土壤, 土质松散, 有 机质含量高, 重金属在其中发生较复杂的物理、化学、 生物作用, 兼有农业耕作的混合作用。底部有耕作机 械压实、渗透系数较小、厚度约几厘米的犁底层存 在。宜采用黑箱模型, 见图 2。



图 2 耕作层模型

Figure 2 Model of cultivation layer in soil

对耕作层的灌水进行衡算,可得到水流运动模型:

$$q_1 = kF_0 t_1 = q_0 - aV - bt_1 \tag{1}$$

式中: k——犁底层渗透系数, m・d⁻¹;

F₀——每667 m² 农田的表面积, m²;

ti---灌水通过耕作层的时间,d;

$$m^{3} \cdot d^{-1};$$

- q₀——作物生长期间,每667 m² 农田灌水量, m³;
- *q*₁——作物生长期内每 667 m² 农田渗入下包气 带的水量, m³;

对耕作层模型中重金属进行衡算,可得到:

$$q_1 C_1 = C_0 q_0 - B_1 C_0 q_0 + B_2 S_0 W_s / 1\ 000$$
 (2)

- 式中: C₁→ 渗入下包气带时的重金属浓度,mg・L⁻¹; C₀→ 灌溉水源中的重金属浓度,mg・L⁻¹;
 - B1----耕作层中的重金属总去除率;

B2——耕作层中重金属的淋失率;

- S₀----灌溉前土壤固相重金属浓度,mg・kg⁻¹;
- W_s----每667 m² 农田耕作层土重,kg。
- 2.2 下包气带数学模型

重金属在土壤中向深层迁移时,固、液相间存在 线性吸附平衡,遵从对流扩散方程^[3]:

$$\partial c / \partial t = D / Rd \cdot \partial^2 c / \partial x^2 - V / Rd \cdot \partial c / \partial x \quad (3)$$

$$Rd = 1 + \rho_{\rm g} \cdot K_{\rm d} / n_{\rm e} \tag{4}$$

$$V = k / n_{\rm e} \tag{5}$$

式中:D-----重金属在土壤中的纵向弥散系数,

$$m^2 \cdot d^{-1};$$

/----平均孔隙流速,m・d⁻¹;

ne——有效孔隙率,%。

2.3 作物吸收模型

作物对重金属的吸收受到土壤性质、作物根系特征的综合影响,重金属向作物体内迁移的过程和机理见图 3。其中,根系直接截获作用可忽略不计^[4]。

2.3.1 土壤中重金属的释放

作物根系主要分布于土壤表层 0—40 cm 内,由 于地表蒸发及作物吸收,该层土壤含水率通常较低, 深层水分可以上升至该层满足作物需要。另外,重金 属也主要分布在该层中。

如图 4, 对 0—40cm 土壤固相重金属含量及水量 进行衡算:

$$ds = (u_2 C_2 dt - dA_3) / W \tag{6}$$

$$u_2 = (Q_1 - Q_2 - aV_s) / T$$
 (7)

其中: ds----dt内,土壤固相重金属含量变化,

- *u*₂——每667 m² 农田中, 向 0—40 cm 土层运移 的水分流量, L·d⁻¹;
- C2----40 cm 深处土壤液相重金属的浓度,

$$mg \cdot L^{-1};$$

- dA3----每667 m²农田中,每天作物根系吸收重 金属量,mg;
- W——每667 m²农田中, 0—40 cm 土层土重, kg;

$$Q_2$$
——作物生长期间,每 667 m² 农田总降水量,





图 3 重金属在土壤 – 作物系统中的迁移

Figure 3 Transferring of heavy metals in soil - crop ecosystem



Figure 4 Absorption model of crops on the heavy metals

Vs----每667m农田0-40 cm土壤体积,L;

T----作物生长期,d。

2.3.2 重金属向根表的迁移

(1)扩散作用

当作物根系对重金属的吸收速度与质流输送速 度不等时,会在垂直于根表的方向上产生浓度梯度, 引起重金属的扩散。重金属在土壤固、液相间存在着 持留释放平衡^[5],情况较为复杂。如图 5,在扩散深度 范围内任取 x0—x0 + dx 微元,对土壤液相中重金属 进行衡算可得到:

$$J = (C - C_{\rm r}) \cdot \sqrt{(\rho \cdot K_{\rm d} + 1)D_{\rm p'}(\pi t)}$$
(10)

式中: Cr---作物根表重金属浓度, mg·L⁻¹;

度, mg・L⁻¹;

任意时段 dt 内,到达根系表面的重金属扩散量:

$$dA_1 = 2 \cdot (C - C_r) \quad \sqrt{(\rho \cdot K_d + 1) D_p \pi / t} \cdot \gamma \cdot L(t) \cdot 1000 \cdot dt$$

式中:γ----作物根系的平均半径,m;

图 5 根系扩散模型

Figure 5 Diffusion model of the heavy metals in rhizosphere

图 6 作物根系与生长期关系 Figure 6 Relationship of crop roots and growth periods Barber & Mengel^[6] 发现玉米种子发芽后,在很短时间内根系迅速增长,然后线性增长,至抽穗期达到最大值,之后又迅速下降,到成熟期,根长仅为最大值的1/3。其它作物根系的变化趋势类似(见图6)。据此建立作物根系生长模型:

$$L(t) = (L/T_1) \cdot t \qquad t < T_1 \tag{12}$$

$$L(t) - L = [(L - L/3)/(T_1 - T)] \cdot (t - T_1)$$

$$t \ge T_1 \tag{13}$$

式中; L(t)—t 时刻每 667 m² 农田中根系总长,m;

*T*₁——作物籽实开始形成的时间(抽穗期),d; *L*——每 667 m² 农田中根系总长度的最大值,

 $\rm m_{\,\circ}$

(2) 质流输送作用

假设作物吸水量与作物根长成正比,可得到 *dt* 内质流输送至根表的重金属量 *dA*₂ 及任一时刻作物 根系吸水速度 *u*(*t*):

$$dA_2 = C \cdot u(t) \cdot dt \tag{14}$$

$$u(t) = [L(t)/L] \cdot U \tag{15}$$

$$\int_{0}^{T} u(t) dt = Q_{1} - Q_{3}$$
(16)

式中: U——生长期内,每 667 m² 农田中作物最大吸 水速度, L·d⁻¹;

Q3——生长期内,每667 m² 农田蒸发水量,L, 见图4。

2.3.3 根系吸收作用

(11)

作物根系对重金属的吸收过程目前尚不能充分 解释,但很多研究发现作物根系吸收的重金属量与 到达根表重金属量正相关,根系对高浓度有害物质的 吸收有调控机理。cataldo发现土壤中镍浓度与作物 吸收量间存在一种类似 Michaelis – menten 公式关 系;Huffaker & Rains 发现作物根系对养分的吸收符合 Langmuir 吸附关系式形式的动力学方程; Nissen 发现 根系对硫的吸收符合 Michaelis – Menten 公式,而作 物根系对盐的吸收也符合该式^[7]。不考虑多种重金属 间的协同、拮抗作用得到载体论模式:

$$v = V_{\max} C_r / (k_m + C_r)$$
(17)

式中: v——作物根系对重金属的吸收速度,

 $mg \cdot d^{-1} \cdot m^{-1};$

Vmax——作物根系对重金属的最大吸收速度,

$$mg \cdot d^{-1} \cdot m^{-1};$$

任一时刻, dt 时间内根系吸收的重金属总量:

$$dA_3 = v \cdot L(t) \cdot dt$$

= $[V_{\max} C_r / (k_m + C_r)] \cdot L(t) \cdot dt$

根系的吸收为一非稳态过程,但由于作物吸收 重金属量远远小于土壤中贮量,在时间微段 *dt* 内,可 认为土 - 根系统处于稳态:

 $dA_1 + dA_2 = dA_3$

2.3.4. 重金属在作物体内的分配

重金属在作物各器官间分布模式受环境因素、 生理因素、吸收时期、吸收部位、重金属浓度等因素 影响。迄今为止,这方面的系统研究很少,但据众多 研究结果^[8],可认为作物籽实中重金属含量大致与 作物籽实生长期间根系吸收总量线性相关。

 $C_{\rm p} = \int_{T_1}^T f dA_3 / W_p$

式中: f----根系吸收的重金属在作物籽实中分配比

例;

 C_p ——作物籽实中重金属浓度, mg·kg⁻¹;

W_P----作物 667 m² 产量, kg₀

3 模型参数的确定

本研究以陕西交口灌区为代表,对重金属在农田 生态系统中的迁移进行模拟,经采样分析及与当地有 关部门合作取得模型参数。

4 结果与分析

本研究对交口灌区地下水中的 Pb、农作物中的 Pb、Cd、Hg 进行了模拟得到以下结果。

从表 1、2 可看出,本研究所建立的作物吸收模型

表 1	地下水水质模拟结果	(mg • L ⁻¹)
-----	-----------	-------------------------

Table 1	Quality of	f underground	water from	the simu	lating	model
---------	------------	---------------	------------	----------	--------	-------

重金属 -	实测值						模拟值			
	1#	2#	3#	4#	5#	1#	2#	3#	4#	5#
Pb	0.004	0.005	0.005	1.328	0.006	0.004	0.005	0.005	0.004	0.006

表 2	作物	吸收	模型模	拟结	ī果	(_{mg}	g•kg⁻¹)	
m 11 0	A 1		c	c	.1		1.1	1

 Table 2
 Absorption of crops from the simulating model

项目 -			实测值			模拟值			
		1#	2#	3#	1#	2#	3#		
Pb	小麦	0.050	0.061	0.073	0.051	0.060	0.072		
	玉米	0.060	0.068	0.070	0.061	0.069	0.070		
Cd	小麦	0.008	0.009	0.014	0.008	0.010	0.015		
	玉米	0.010	0.040	0.070	0.013	0.038	0.067		
Hg	小麦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		
	玉米	0.009	0.012	0.014	0.010	0.013	0.014		

能较好地用于灌区作物污染的预测,精度较高,模拟 值与实测值吻合较好。地下水的模拟结果有一定误 差,其中4#样点可能有特殊污染源。

5 小结

(1)本文探索了重金属在农田生态系统中迁移的 数学模型,并对陕西交口灌区进行了模拟,取得了较 满意的效果。但由于模型涉及土壤、重金属、作物性 质等多项参数,模拟值与实测值还有一定误差,有待 对该模型进一步研究。 (2)本文对农田生态系统中重金属的迁移进行了 模拟,但该模型也可用于其它污染物的模拟。

参考文献:

- [1] 刘兆昌.华北地区污灌系统对地下水污染的数学模拟[J].中国 环境科学,1989,9(6):406-414.
- [2]张 利,张彩云.非灌溉条件下旱地土壤水分蒸发及作物耗水量的初步研究[J].土壤通报,1986,17(6):265-267.
- [3]孙讷正.地下水污染数学模型和数值方法[M].北京:地质出版 社,1989.
- [4] 吴启堂. 一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型[J]. 土壤学报,1994,31(1):68-75.
- [5]张增强,张一平.化学物质在土壤中的持留释放与运移[J].农业 环境保护,1997,16(4):168-170.
- [6] Barber S A. Soil Nutrient Bioavailiability A Mechanistic Approach. John & Wiley & Sons Inc, New York, 1984. 58 – 134.
- [7] Nissen D. Multiphasic uptake in plants H. mineral cations, chloride and boric acid[J]. physiologia plantrum, 1973, 29:254 – 298.
- [8]丁中元.重金属在土壤、作物中分布规律研究[J].环境科学, 1989,(5):78-84.