

一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型

吴启堂

(华南农业大学土化系, 510642)

J. L. Morel, A. Guckert

(*ENSAT. Phytotechnie-INRA, 54505 Nancy, France.*)

摘 要

本文根据土壤重金属向植物体转移的机理,提出了一个土壤-植物系统中元素解吸、迁移、吸收的联合数学模型,推导出植物吸收量与土壤溶液浓度、缓冲能力系数、扩散系数、根系总长度、平均半径、植物蒸腾量、生长时间等参数的定量关系式。用该模型计算的植物吸镉量与盆栽黑麦草实际吸镉量之间具有很高的相关性和较好的准确度。

关键词 镉,黑麦草,解吸作用,迁移,吸收,数学模型

随着现代工农业的发展,重金属对环境的污染问题也变得突出^[1,2]。这些重金属主要通过食物链在人体内累积,导致机体受损^[3,4]。在食物链中,植物所含这些元素的高低至关重要,因此许多研究工作都在探索土壤-植物系统重金属迁移的问题^[1-2,5-6]。本文对定量预测这一迁移过程提出了一个原理性数学模型,并通过盆栽黑麦草对其中一个重要的元素——镉的吸收试验加以检验。

一、原理和方法

重金属由土壤向植物迁移的过程和机理可用图 1 简要地表示。

土壤元素从土壤固相到达植物根表面主要是经土壤溶液,通过质流运输和扩散作用实现的,而通过根系直接截获和在固相、气相中的扩散作用传输的数量是可以忽略不计的^[7]。因此,土壤元素从固相解吸到土壤溶液,再迁移至根表,最后被根系吸收,是需要定量的三个主要过程。

(一) 土壤元素解吸模型

植物根系吸收土壤溶液中的元素而降低其浓度,土壤固相便通过解吸作用来补充。土壤元素解吸作用可用土壤溶液该元素的浓度随水土比的变化曲线来表征。该曲线通常为负指数幂函数:

$$C = C_1 \cdot H^{-a} \quad (0 < a < 1) \quad (1)$$

式中 C 为在某一水土比(稀释度)时的土壤溶液元素浓度, H 为水土比。回归常数 C_1 为在水土比等于 1 时的 C ; a 为描述 C 值 H 的变化趋势。 a 越大, C 随 H 的增加就下降得越快,也就是说,土壤缓冲能力越弱。

土壤可解吸的元素含量,即可供植物根系吸收的元素含量,可通过(1)式联合根系吸收动力学方程来估计。该动力学方程为^[7]:

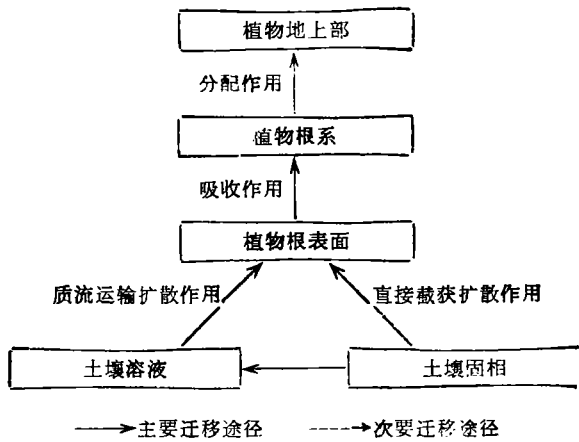


图 1 重金属在土壤-植物系统中的迁移过程

Fig. 1 Heavy metal transfer in soil-plant systems

$$I = \frac{l_{max} \cdot (C - C_{min})}{K_m + C - C_{min}} \quad (2)$$

式中 I 为吸收速率; l_{max} 为最大吸收速率; C 为溶液浓度; K_m 为 I 达到 $1/2 I_{max}$ 时的 C ; C_{min} 为根系净吸收速率大于零时所要求的溶液最低浓度。因此, 在土壤溶液元素浓度逐渐低至 C_{min} 时, 土壤固相所能解吸出来的该元素最大量, 即为可供根系吸收的有效元素含量。该含量可用积分的方法来计算:

$$Q = \int_{C_0}^{C_{min}} C \cdot dH = \int_{H_0}^{H_{max}} C_1 \cdot H^{-a} dH \quad (3)$$

式中 Q 为土壤有效元素含量; H_0 为风干土起始湿度, C_0 为相应的土壤溶液浓度; H_{max} 为土壤溶液低至 C_{min} 时的最大稀释度。根据(1)式有:

$$C_{min} = C_1 \cdot H_{max}^{-a} \quad (4)$$

解(3)式并代入(4)式可得:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{C_1}{1-a} (H_{max}^{1-a} - H_0^{1-a}) \\ &= \frac{C_1^{1/a}}{1-a} (C_{min}^{(-\frac{1}{a}+1)} - C_0^{(-\frac{1}{a}+1)}) \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式表明, C_1 越大, 土壤可供植物吸收的元素含量越高; a 和 C_{min} 越大, 该含量越低。

目前只有很少一部分植物和元素的 C_{min} 是知道的^[7], 因此, 在实用上可假定 $H_{max} = 100$, $H_0 = 0.05$ 来估计土壤可解吸性元素含量, 即:

$$Q \approx \frac{C_1}{1-a} (100^{1-a} - 0.05^{1-a}) \quad (6)$$

因此, 我们可以通过测定不同水土比情况下(如 1:1, 1:2.5, 1:5, 1:10)的土壤溶液浓度来得到两个回归常数 C_1 和 a , 再根据下两式计算在田间湿度 (H_i) 条件下的土壤溶液浓度 (C_i) 和相应的平均缓冲能力系数 (b):

$$C_i = C_1 \cdot H_i^{-a} \quad (7)$$

$$b = Q/C_i \quad (8)$$

(二) 质流运输和扩散作用

植物吸水而产生一个流向根表的水流, 把解吸在溶液中的元素带到根表。单位体积质流带走的元

素占可解吸性元素总量的比例为:

$$\frac{C_i - 1}{C_i \cdot b \cdot W} = \frac{1}{b \cdot W}$$

式中 C_i 和 b 如前所述, W 为提供质流的土体重量。质流运输使土壤溶液元素浓度降低的趋势可用下式描述:

$$C = C_i \cdot \left(1 - \frac{1}{Wb}\right)^U \quad (9)$$

式中 U 为质流量, 即为植物吸水量。

质流运输给根表提供的元素总量则为:

$$\begin{aligned} Q_{mf} &= \int_0^U C_i \cdot \left(1 - \frac{1}{Wb}\right)^U \cdot dU \\ &= C_i \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{Wb}\right)^U - 1\right] / \ln\left(1 - \frac{1}{Wb}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式也可用比较简单的经验式表示之:

$$Q_{mf} = C_i \cdot U^B \quad (11)$$

式中 B 为修正系数, 模拟土壤缓冲能力(b)对质流运输的影响, 缓冲能力越大, B 越接近 1。若土壤缓冲能力弱 ($b \leq 3$), B 可取 0.9; 若缓冲能力中等 ($3 < b \leq 10$), B 可取 0.95; 若缓冲能力强 ($b > 10$), B 可取 0.98。

当植物根系对某一元素的吸收量和质流运输所提供的元素量不等时, 会在垂直于根表的方向上产生一个浓度梯度, 而引起扩散作用。对于符合准无限条件的扩散作用, 扩散量的大小可用下式描述^[11]:

$$Q_d = 2(C_2 - C_1) \cdot \left(\frac{DT}{\pi}\right)^{1/2} \cdot S \quad (12)$$

式中 Q_d 为 T 时间内通过扩散界面 S 的元素量; C_2 和 C_1 分别为高浓度介质和低浓度介质的起始离子浓度; D 为扩散系数; π 等于 3.1415。

对于土壤-根系系统, 若根与根之间对元素无竞争性吸收, 即根与根之间的距离较远 (如大田作物), 且根表浓度在短时间内看作不变, 则在根长为 L 处的很小一段根 (dL) 所接受的扩散量为:

$$dQ_d = 2(C_i - C_r) \cdot b \cdot d \cdot \left(\frac{D}{\pi}\right)^{1/2} \cdot [(L_1 - L)/K]^{1/2} \cdot 2\pi R_0 dL \quad (13)$$

式中 Q_d, C_i, b, D, π 如前述; C_r 为根表面溶液浓度; d 为土壤容重, 旨在把单位重量浓度化为单位体积浓度; L_1 为总根长; K 为根生长速率; $(L_1 - L)/K$ 为扩散时间; R_0 为根系平均半径。

全部根系所接受的扩散量则为:

$$Q_d = \int_0^{L_1} dQ_d = \left(\frac{8}{3}\right) \cdot (C_i - C_r) \cdot b \cdot d \cdot (\pi d)^{1/2} \cdot R_0 \cdot L_1 \cdot T_1^{1/2} \quad (14)$$

式中 T_1 为根系生长时间, 且 $T_1 = L_1/K$ 。

(三) 植物根系吸收

根系吸收速率和根表溶液元素浓度 C_r 之间的关系符合(2)式, 则在根长为 L 处的很小一段根 (dL) 所吸收的元素量为:

$$dA = I_{\max} \cdot (C_r - C_{\min}) \cdot (K_m + C_r - C_{\min})^{-1} \cdot \left(\frac{L_1 - L}{K}\right) \cdot 2\pi R_0 \cdot dL \quad (15)$$

根系总吸收量为:

$$A = \int_0^{L_1} dA = I_{\max} \cdot (C_r - C_{\min}) \cdot (K_m + C_r - C_{\min})^{-1} \cdot \pi R_0 \cdot L_1 \cdot T_1 \quad (16)$$

对于根表面来说,根系总吸收量应该等于质流运输和扩散作用所提供的元素总量之和,即:

$$A = Q_m + Q_d$$

$$I_{max} \cdot (C_r - C_{min}) \cdot (K_m + C_r - C_{min})^{-1} \cdot \pi R_0 \cdot L_1 \cdot T_1$$

$$= \left(\frac{8}{3}\right) \cdot (C_i - C_r) \cdot b \cdot d \cdot R_0 \cdot L_1 \cdot (\pi D T_1)^{1/2} + C_i U^B \quad (17)$$

(17)式中除 C_r 外,其余参数均为比较稳定且可以测定的土壤或植物参数,故可变换为 C_r 的一元二次方程。解此方程可得在植物生长期根表面土壤溶液该元素的平均浓度。

对于土壤微量元素(如重金属)或难移动的元素(如 P),根表土壤溶液浓度 C_r 很快变得很微弱,用(16)式解出来的 C_r 远小于 C_i ,即:

$$C_i - C_r \approx C_i$$

因此,

$$A = Q_m + Q_d$$

$$\approx \left(\frac{8}{3}\right) C_i \cdot b \cdot d \cdot R_0 \cdot L_1 \cdot (\pi D T_1)^{1/2} + C_i U^B \quad (18)$$

这样,根系吸收动力学常数 (I_{max} , K_m , C_{min}) 便被省略了。其他研究也表明,这些常数对植物吸收土壤微量元素影响甚小^[9,10]。

表 1 第一年盆栽试验各处理土样的土壤特征参数

Table 1 Characteristic parameters of soil samples used in the first-year pot experiment

土壤处理 Soil treatment	砂 土 Sand				壤 土 Loam			
	对照 CK	镉盐 Cd	污泥 1 Sludge (1)	污泥 2 Sludge (2)	对照 CK	镉盐 Cd	污泥 1 Sludge (1)	污泥 2 Sludge (2)
有机质(g/kg)	12	12	19	19	18	18	25	25
pH	5.8	5.8	6.7	6.6	6.0	6.0	7.0	7.0
全镉(mg/kg)	0.4	3.4	1.6	4.6	0.4	6.4	1.6	4.6
镉解吸常数								
C_i^* ($\mu\text{g/l}$)	0.92	24.89	1.24	4.49	0.620	40.20	1.55	2.70
a	0.882	0.883	0.715	0.709	0.690	0.882	0.415	0.333
r	0.978	0.987	0.983	0.919	0.971	0.986	0.976	0.985
Q ($\mu\text{g/kg}$)	7.9	215.0	14.3	52.5	7.5	347.0	38.7	86.7
模型参数								
C_i ($\mu\text{g/l}$)	3.0	125.0	4.0	14.0	1.6	153.0	2.8	4.3
b	2.6	1.7	3.6	3.8	4.7	1.8	13.3	20.1
B	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	0.90	0.98	0.98
D ($10^{-9}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	30	50	4	6	20	30	2	3

C_i^* 为水土比等于 1 时的溶液浓度; a 为缓冲能力参数; r 为解吸曲线回归相关系数;砂土 $n = 5$, 壤土 $n = 4$; Q 为可解吸性镉。

用(18)式计算植物吸收量需要 4 个土壤参数,其中 C_i 和 b 由前述解吸模型测定, B 根据 b 而定, D 的测定可采用放射性同位素示踪法^[11]。植物参数有根的平均半径(R_0),总根长 L_1 , 植物吸水量(U), 这些参数的测定见有关资料^[7,10]。

为了检验该模型,我们进行了连续二年的黑麦草盆栽试验。土样取自法国洛林地区的冲积性棕壤

表 2 第二年盆栽试验各处理土样的土壤特征参数
Table 2 Characteristic parameters of soil samples used in the second year pot experiment

土壤处理 Soil treatment	砂 Sand							壤土 Loam								
	CK	Cd	Cd×2	S ₁	S ₁ ×2	S ₂	S ₂ ×2	CK	S ₁	S ₁ ×2	S ₂	S ₂ ×2	Cd ₁	Cd ₁	Cd ₂	Cd ₂
有机质(g/kg)	12	12	12	19	26	19	26	18	25	32	25	32	18	18	18	18
pH	6.0	6.1	6.1	7.0	7.0	6.9	7.1	6.4	7.1	7.3	7.2	7.1	5.5	6.1	6.8	6.3
全镉(mg/kg)	0.4	3.4	6.4	1.6	2.8	4.6	8.8	0.4	1.6	2.8	4.6	8.8	6.4	6.4	6.4	6.4
镉解吸常数																
C ₁ (μg/l)	0.9	24.8	34.4	1.4	2.6	5.8	5.9	0.50	1.4	3.0	5.4	12.1	41.5	17.9	8.9	15.4
a	0.74	0.73	0.62	0.57	0.54	0.50	0.43	0.67	0.22	0.41	0.62	0.77	0.79	0.63	0.46	0.65
Q	10	279	489	18	63	114	140	6	65	78	78	126	413	250	—	207
模型参数																
C ₁ (μg/l)	3.0	79.9	93.6	4.1	8.7	13.0	11.8	1.0	1.8	4.9	11.4	30.4	107.5	38.2	15.6	33.5
b	3.4	3.5	5.2	4.4	7.2	8.8	11.9	5.7	35.7	15.8	6.8	4.1	3.9	6.6	12.6	6.2
B	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	0.95	0.98	0.98	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	0.95
D(10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)	30	50	60	4	4	6	6	20	2	2	3	3	50	30	20	50

* CK 为对照; Cd×2 为镉盐 2 倍加入量; S₁ 为污泥 1; S₂ 为污泥 2; Cd₁₋₂ 为镉盐 + 不同形态氮肥。

和淋溶性棕壤^[13],前者属砂土,后者为壤土。在这两种土壤上加入了不同含量和形态(镉盐或城市污泥)的镉,且设置了施用不同氮肥的处理^[13]。根据前述方法,我们测定了不同处理土样参数(表1、表2)和盆栽黑麦草的根系形态特征参数(表3)。根据(18)式,我们计算了黑麦草吸镉量,并和用原子吸收光谱法测定的实际吸收量作了对比。

表 3 植物根系特征参数

Table 3 Characteristic parameters of plant roots

处 理 Treatment	生长时间 Growth time (10 ⁴ sec.)	根系平均半径 Average root radius (cm)	根系总长 Total root length (10 ⁴ cm)		植株吸水量 Water uptake (cm ³)	
			砂土 Sand soil	壤土 Loam	砂土 Sand soil	壤土 Loam
第一年盆栽试验						
第一次收割	2.6	0.01	18.8	20.7	300	350
第二次收割	5.2	0.01	31.3	34.4	700	775
第三次收割	7.8	0.01	35.4	39.0	1100	1200
第四次收割	10.4	0.01	37.5	41.2	1300	1400
第二年盆栽试验						
第一次收割	2.6	0.01	20.2	18.8	415	400
第二次收割	5.2	0.01	31.2	30.6	820	820
第三次收割	7.8	0.01	41.7	42.8	1205	1300

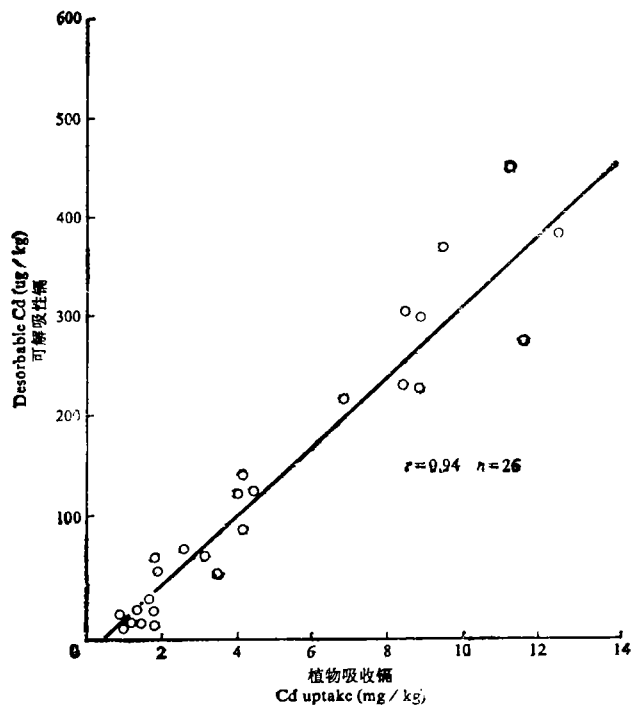


图 2 土壤可解吸性镉与植物地上部镉浓度的关系

Fig. 2 Relationship between the desorbable cadmium in soil and the cadmium content in the plant shoots

二、结果

用解吸模型计算的土壤可解吸性镉与黑麦草地上部镉含量具有极显著的相关性(图2)。

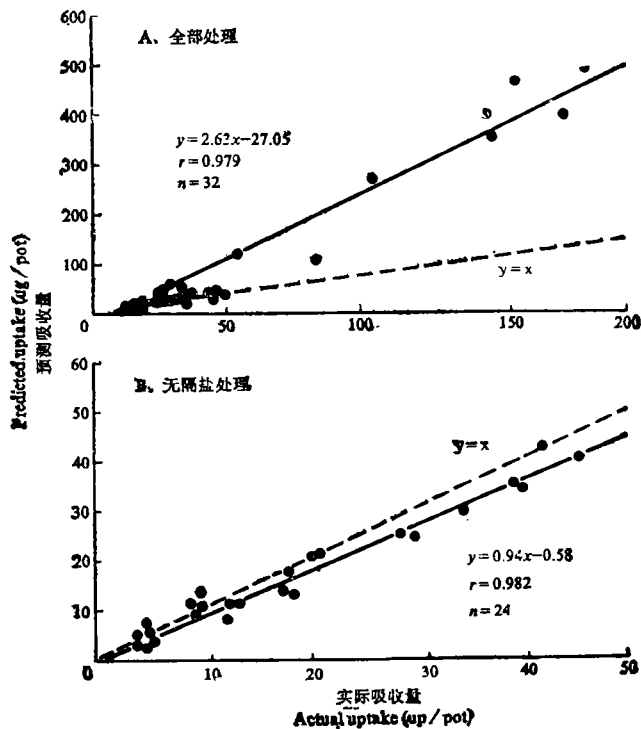


图 3 预测吸收量与盆栽黑麦草实际吸收量的关系

Fig. 3 Relationship between the predicted uptake and the actual uptake of cadmium by ryegrass grown in pots

用(18)式预测的黑麦草吸镉量和第一年盆栽黑麦草实际吸镉量具有很高的相关性(图3,A)。在实际吸镉量小于 $50 \mu\text{g}/\text{盆}$ 的区域,即去除镉盐处理的土样,预测吸收量很接近实际吸收量(图3,B)。这些结果表明,对于一般的土壤,该模型是适用的,但对于受可溶性镉严重污染的土壤,预测吸收量则高于实际吸收量。

第二年的结果与第一年的类似,预测吸收量($y, \mu\text{g}/\text{盆}$)与实际吸收量($x, \mu\text{g}/\text{盆}$)的关系式为:

$$y = 2.27x - 26.38 \quad (r = 0.868, n = 48)$$

去除镉盐处理的土样,它们之间的关系式为:

$$y = 1.45x - 6.56 \quad (r = 0.936, n = 30)$$

三、讨 论

人们常用某一化学试剂浸提的重金属含量来表征其对植物的有效性^[6], 并得到了某些经验关系式^[1,14]。这种方法只能对同一土壤和植物类型才具有定量或半定量的指导意义。Barber-Cushman 模型综合考虑了土壤性质和植物特征, 对于预测植物对某一土壤元素的吸收具有更广泛的意义^[7], 且被用来研究生长在人工气候箱的玉米植株对镉和锌的吸收^[10]。但是该模型所需参数较多, 测定工作量大, 因此仍未被广泛应用。本文根据土壤溶液元素浓度与水土比的关系曲线, 与植物根系吸收机理联系起来, 提出了一个解吸模型。试验表明, 解吸模型推算的可解吸性镉含量与植物吸镉量具有显著的相关性。解吸模型可用于估计任何土壤水分含量条件下的土壤溶液所含某一元素的浓度和相应的土壤缓冲能力系数, 从而简化了土壤参数的测定。预测植物吸收量的最后模型(18式)所需参数相对较少, 计算明显简化, 因此增加了原理性数学模型的实用性, 并且在盆栽试验条件下得到了初步验证。

根据 Nye 和 Tinker 的研究^[12], 扩散系数 (D) 与同元素在无限稀释的水溶液中的扩散系数 (D_i)、土壤结构性阻碍因子 (f)、土壤湿度 (Q , 体积比) 和土壤缓冲能力系数 (b) 具有下列关系:

$$D = D_i \cdot f \cdot \frac{Q}{b} \quad (19)$$

将该式代入(18)式可得:

$$A = \left(\frac{8}{3}\right) \cdot C_i \cdot b^{\frac{1}{2}} \cdot d \cdot (\pi \cdot D_i \cdot f \cdot Q)^{\frac{1}{2}} \cdot l_i \cdot R_0 \cdot T_1^{\frac{1}{2}} + C_i U^B \quad (20)$$

从(18)和(20)式可知, 影响植物吸收重金属的最重要的土壤参数是土壤溶液浓度(C_i), 其次是土壤缓冲能力(b)和扩散系数(D)。(20)式还表明, 表达土壤向植物根系供给某一元素的能力的较好参数是 $C_i b^{\frac{1}{2}}$ 这个复合变量, 因为其他土壤参数较稳定, 或者属于植物参数, 受植物的影响。在植物参数中, 对重金属吸收影响最大的是根系表面积 ($2\pi R_0 \cdot L_i$), 其次为生长时间(T_1)和植物吸水量(U)。因此, 导致植物根冠比增大, 植株生长速率减慢, 耗水量增加的环境和品种因素都有可能增加植物产品的重金属浓度, 这在盆栽试验中已经表现出来^[13]。

本文介绍的植物根系吸收模型(18式)对于受水溶性镉严重污染的土壤, 高估植物吸收量, 这个误差可能与未用(17)式解出 C_i 有关, 另外模型未考虑植物本身对重金属吸收的调节机理。有研究表明, 根系大分子分泌物对重金属的活性有抑制作用^[16]; 植物根系本身的元素浓度也对根系吸收有反馈抑制作用^[17]。这两种作用在土壤重金属活性高时可能减少植物根系对它的吸收。对这些问题的更深入研究, 对完善植物根系吸收模型, 将是有益的。

参 考 文 献

1. 高拯民, 1986: 土壤—植物系统污染生态研究, 1—79页, 中国科技出版社。
2. Adriano, D. C. 1986: Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, Inc. New

- York, pp. 1—21.
3. Friberg, L. et al., 1974: Cadmium in the Environment. CRC press, Ohio, pp. 248.
 4. Adriano, D. C. 1986: Trace Elements in the terrestrial Environment. Springer-Verlag, Inc. New York, pp. 139—141.
 5. Morel, J. L. et al., 1988: Effet et arriere-effet de l'epandage de boues urbaines sur la teneur en metaux lourds d'un mais. *Agronomie*, 8:107—113.
 6. Leschber, R. D. et al., 1984: Chemical Methods for Assessing Bioavailable Metals in Sludges and Soils. Elsevier Appl. Sci. Publ., London, pp. 32—66.
 7. Barber, S. A. 1984: Soil Nutrient Bioavailability—A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 90—118.
 8. Crank, G. 1955: The Mathematics of Diffusion. Clarendon Press, Oxford, pp. 30—31.
 9. Silberbush, M. & S. A. Barber, 1983: Sensibility analysis of parameters used in simulating potassium uptake with a mechanistic mathematical model. *Agron. J.*, 75:851—854.
 10. Mullins, G. L. et al., 1986: Modeling the plant uptake of cadmium and zinc from soils treated with sewage sludge. *J. Environ. Qual.*, 50:1245—1255.
 11. Phillips, R. E. & D. A. Brown, 1965: Ion diffusion: III. The effect of soil compaction on self-diffusion of radium-86 and strontium-89. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 657—666.
 12. Duchaufour, P. 1978: Ecological Atlas of Soils of the World, Masson Publ. New York, pp.105—156.
 13. Wu, Q. T. et al., 1989: Effect of nitrogen source on cadmium uptake by plants. *C. R. Acad. Sci., Serie III*, 309:215—220.
 14. Browne, C. L. et al., 1984: A predictive model for the accumulation of cadmium by container-grown plants. *J. Environ. Qual.*, 13:184—188.
 15. Nye, R. H. & P. B. Tinker, 1977: Solute Movement in the Soil-Root System. *Studies in Ecology*. Vol. 4, Blackwell Sci. Publ., Oxford, pp.69—91.
 16. Morel, J. L. et al., 1986: Measurement of Pb⁺⁺, Cu⁺⁺, and Cd⁺⁺ binding with mucilage exudates from maize (*Zea mays* L.) roots. *Biol. Fertil. Soils*, 2:29—34.
 17. Sldiqi, M. Y. & A. D. M. Glass, 1982: Simultaneous consideration of tissue and substrate potassium concentration in K⁺ uptake kinetics: A model. *Plant physiol.*, 69:283—285.

A MECHANISTIC MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE UPTAKE OF HEAVY METALS BY PLANTS

Wu Qitang

(South China Agricultural University, 510642 Guangzhou)

J. L. Morel, A. Guckert

(ENSAIA, Phytotechnic-INRA, 54505 Nancy, France)

Summary

The paper put forward a coupled mathematical model of element desorption, transfer and root uptake of heavy metals in soilplant systems, and gives the theoretical quantitative relationships between the plant uptake, on the one hand, and soil solution concentration, soil buffer power, diffusion coefficient, total root length, average radius, water transpiration and growth time on the other. The pot experiments showed that the calculated uptake with this model was highly correlated with the actual uptake of cadmium by ryegrass, and the model could be used to predict rather well the effective uptake.

Key words Cadmium, Ryegrass, Soil desorption, Element transfer, Root uptake, Mathematical model