

灌溉入渗条件下农田土壤水盐动态简化模型及应用*

张妙仙 杨劲松

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 率先采用线性简化式, 并引入优先流系数来表示计算土层下边界渗漏水流量; 然后导出了计算土层入渗前后土壤储水量变化公式, 在此基础上又引入淋洗系数, 导出了入渗前后土壤储盐量变化公式。通过对公式的讨论, 提出了灌溉水矿化度临界方程, 讨论了淋洗系数和优先流系数的物理意义和影响因素。本文所建模型简单适用, 而且与田间实测灌溉水矿化度临界方程极其吻合, 可为农田灌溉水矿化度的选择提供参考。

关键词 入渗, 水盐动态模型, 灌溉水矿化度, 临界方程, 优先流系数, 淋洗系数

中图分类号 S152.7⁺2, S156.4⁺1

灌溉水不仅给土壤带来作物生长所需的水分, 而且会给土壤带来有害的盐分。特别是由于优质淡水资源日趋紧张, 在利用微咸水、咸水和污水灌溉的条件下, 这些劣质水对土壤, 特别是上部主要耕作层水盐动态的影响显得更加重要。为此, 本文本着简单适用易于推广的原则, 从农田实际出发, 提出了灌溉水入渗条件下的农田土壤水盐动态简化模型。

1 灌溉水入渗条件下的农田土壤水盐动态简化模型

1.1 入渗后计算土层储水量变化模型

由于虫洞、根孔和干缩裂缝等大孔隙结构的发育, 田间土壤一般不会发生均匀渗透, 部分入渗水会较迅速地直接从这些较大孔隙中漏走, 产生所谓的优先流^[1]。因此, 在建立入渗水流模型时, 首先引入优先流系数 f_1 , 表示优先流所占的比例系数。对于某一土层, 设入渗率为 i , 则 $(1-f_1)i$ 发生均匀渗透, f_1i 为不均匀的大孔隙流即优先流。对于 f_1i 部分快速水流, 本文忽略其淋盐作用。

有关土壤表面入渗规律的经验、半经验半理论公式^[2]较多也比较成熟, 但相应情况下该土层下边界水分渗漏规律的同类公式却很少。因此, 对于 $(1-f_1)i$ 均匀入渗渗透水流, 我们假设土层下边界水流通量 q 与土层储水量 W 呈线性关系, 即:

$$\frac{q}{(1-f_1)i} = \frac{w-w_0}{w_s-w_0} \quad (1)$$

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999011803 支持

收稿日期: 2000-04-26; 收到修改稿日期: 2001-02-05

又

$$\frac{dw}{dt} = (1 - f_1) i - q \quad (2)$$

式中, W_s —计算土层饱和储水量, mm; W_0 —计算土层初始储水量即灌前一定土层的储水量, mm; q —土层下边界水流通量, mm s^{-1} ; i —上边界入渗率, mm s^{-1} ; t —时间, s; f_1 —优先流系数, 无量纲。当 $W = W_0$ 时, $q = 0$; 当 $W = W_s$ 时, $q = (1 - f_1) i$ 。

公式(1)表示土壤未饱和时地面入渗率 i 大于土层下部的渗漏率 q , 随着土壤含水量 W 的增加, q 增大, 当土壤饱和时 $q = (1 - f_1) i$ 。为了计算土层下边界渗漏率 q , 本文提出了该线性假设。通过室内土柱和田间灌溉试验验证, 该公式基本符合实际。

因为人们并不关心入渗过程中水盐的变化, 主要是关心入渗后的结果。所以, 设 i 为常量, 则解上述微分方程, 有:

$$q = \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{t(1-f_1)i}{w_s - w_0} \right] \right\} (1 - f_1) i \quad (3)$$

$$w = w_s - (w_s - w_0) \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{t(1-f_1)i}{w_s - w_0} \right] \right\} \quad (4)$$

设灌水量 I 全部入渗, 则

$$w = w_s - (w_s - w_0) \cdot \exp \left[- \frac{(1-f_1)I}{w_s - w_0} \right] \quad (5)$$

$$\Delta w = (w_s - w_0) \left[1 - \exp \left(- \frac{(1-f_1)I}{w_s - w_0} \right) \right] \quad (6)$$

$$d_p = I - \Delta w \quad (7)$$

$$w_s = 10 \cdot \gamma \cdot D \cdot \theta_s \quad (8)$$

式中, W —入渗后土壤储水量, mm; ΔW —入渗后土壤储水量变化, mm; I —灌水量或降雨量, mm; d_p —下边界渗漏量, mm; D —土层厚度, m; θ_s —计算土层饱和含水量, 占干土重%; γ —土壤容量, T m^{-3} ; 其他意义同前。

1.2 入渗淋洗后计算土层盐量变化模型

在入渗水流中, 由于其淋洗作用, 下边界渗漏水溶液浓度是灌溉水矿化度和原土壤溶液浓度的组合。为此, 引入淋洗系数^[3] f_2 表示渗漏水溶液浓度中原土壤溶液浓度的贡献比例。设土层下边界渗漏量的溶液浓度:

$$C_p = (1 - f_2) C_l + f_2 C_i \quad (9)$$

$$C_i = \frac{S_0}{W_0} \quad (10)$$

式中: f_2 —淋洗系数, 无量纲; S_0 —计算土层初始盐量, g; C_l —灌溉水矿化度, g L^{-1} ; C_i —计算土层土壤溶液浓度, g L^{-1} 。

其盐量变化公式如下:

$$\Delta S = (1 - f_1) I C_l - [(1 - f_1) I - \Delta W] \cdot [(1 - f_2) C_l + f_2 C_i] \quad (11)$$

$$S = a S_0 + b I C_l \quad (12)$$

$$a = 1 + \frac{\Delta w}{w_0} f_2 - \frac{I(1-f_1)}{w_0} f_2 \quad (13)$$

$$b = f_2 + \frac{\Delta w(1-f_2)}{I(1-f_1)} \quad (14)$$

$$S_d = IC_t + S_0 - S \quad (15)$$

式中: S —入渗后计算土层盐量, g; ΔW 由式(6)计算; S_d —计算土层下边界漏盐量, g; 其他意义同前。

1.3 模型参系数物理意义讨论

1.3.1 优先流系数 优先流系数 f_1 表示入渗时优先流所占的比例系数, 数值在 0~1 之间变化, 是无因次的比例系数。由于土壤上层疏松, 大孔隙结构发育, 随着土层深度的加厚, 土壤结构趋于均匀。因此, f_1 一般随着土层的加厚而减少。公式(6)中:

$$W_s = 10 \cdot D \cdot \gamma \cdot \theta_s; W_0 = 10 \cdot D \cdot \gamma \cdot \theta_0; W = 10 \cdot D \cdot \gamma \cdot \theta$$

可反求得:

$$f_1 = 1 + \frac{10 \cdot \gamma \cdot (\theta_s - \theta_0) \cdot D}{I} \ln \left[1 - \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right] \quad (16)$$

令 $\beta = -10 \cdot \gamma \cdot (\theta_s - \theta_0) \ln \left[1 - \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right]$, 则 $f_1 = 1 - \beta \frac{D}{I}$; $1 - f_1 = \beta \frac{D}{I}$;

上式 $1 - f_1$ 表示了土层的储水特性, 并随土层厚度及灌水量而变化。而 β 值相对稳定, 可代表土壤储水特性, β 值越大, 储水能力越大。

1.3.2 淋洗系数 淋洗系数受许多因素影响, 由于较多的灌溉水将通过较大的孔隙迅速地漏走, 来不及溶解更多的盐分, 故具有许多大孔隙的土壤将比无结构土壤的 f_2 值低。由于大孔隙的数量随深度而减小, 故浅根区将比深根区的 f_2 值低。此外, 灌水方法也影响淋洗系数, 实际上 f_2 表示了淋洗效率。博曼斯和德莫伦提出重壤土 f_2 为 0.2, 中等壤质土壤为 0.4, 砂性土可超过 0.6^[3]。

我国现有农田土壤水盐动态资料一般无实测土壤溶液浓度, 仅有土壤全盐量、潜水位和潜水矿化度资料^[4]。而盐却正是以土壤溶液形式运动的, 而且受土壤含水量、盐分组成和溶解度等因素的影响。由式(10)所求的土壤溶液浓度并不是真正的土壤溶液浓度。设真正的土壤溶液浓度为 C_T , 则 $C_T = K \frac{S_0}{W_0}$ 。式中: K 为真值与估计值的比例系数。

$$\therefore C_P = f_2 C_t + (1 - f_2) C_I; \quad C_{PT} = f_{2T} C_T + (1 - f_{2T}) C_I$$

式中: f_{2T} 和 C_{PT} 分别表示真正的淋洗系数和计算土层下边界渗漏水溶液浓度。当 $C_P = C_{PT}$ 时则有下式:

$$f_2 = \frac{KC_t - C_I f_{2T}}{C_t - C_I f_{2T}} \quad (17)$$

上式说明, f_2 值的引入实际上消除了(10)式估计式的误差。 f_2 不仅是淋洗系数, 而且包容了土壤溶液浓度的影响。 f_2 值小于 f_{2T} , f_2 是一综合系数。

入渗过程中土壤积盐率可按下式计算

$$\lambda_1 = \frac{S}{IC_I + S_0}; \quad \lambda_2 = \frac{S - S_0}{IC_I}; \quad \lambda_3 = \frac{S - S_0}{S_0}$$

λ_1 表示土壤灌后含盐量是灌溉水来盐量和土壤原有含盐量之和的倍数, λ_2 表示土壤盐分增量是灌溉水来盐量的倍数, λ_3 表示土壤盐分变化是土壤原始含盐量的倍数。 λ_2 能比较正确地反应灌溉造成土壤积盐和脱盐的关系。 λ_2 大于 1 表示除灌溉水来盐外, 还有其他来盐; $\lambda_2 = 0$ 表示土壤盐分无变化; λ_2 小于 0 表示土壤脱盐; λ_2 在 0 和 1 之间表示灌溉水来盐有下移, 但土壤仍然积盐。

将 λ_2 式和式(11)联立则有

$$\lambda_2 = \frac{\Delta W}{I} + f_2 \left[1 - f_1 - \frac{\Delta W}{I} \right] \left[1 - \frac{C_I}{C_I} \right] \quad (18)$$

$$\lambda_2 = K_r + f_2(1 - f_1 - K_r)(1 - C_r) \quad (19)$$

令 $K_r = \frac{\Delta W}{I}$ 并称其为储水率; 令 $C_r = \frac{C_I}{C_I}$ 并称其为土壤相对浓度, 则有

$$f_2 = \frac{\lambda_2 - K_r}{(1 - f_1 - K_r)(1 - C_r)} \quad (20)$$

2 灌溉水矿化度临界方程

$$\Delta S = f_2 [I(1 - f_1) - \Delta W] (C_I - C_r) + \Delta W C_I \quad (21)$$

由(21)式可知, 当灌溉水矿化度大于土壤溶液浓度时, 淋洗系数越小积盐越少, 淋洗系数越大积盐越多。优先流系数越大积盐越少, 优先流系数越小积盐越多, 灌水量越大积盐越多, 灌水量越小积盐越少。

当灌溉水矿化度小于土壤溶液浓度时, 淋洗系数越大积盐越少, 淋洗系数越小积盐越多。优先流系数越大积盐越多, 优先流系数越小积盐越少, 灌水量越大积盐越少, 灌水量越小积盐越多。

当灌溉水矿化度 $C_I < \frac{C_r \cdot f_2 [I(1 - f_1) - \Delta W]}{\Delta W + f_2 [I(1 - f_1) - \Delta W]}$ 时, 土壤脱盐。淋洗系数越大脱盐越多, 淋洗系数越小脱盐越少。优先流系数越大脱盐越少, 优先流系数越小脱盐越多, 灌水量越大脱盐越多, 灌水量越小脱盐越少。

式(21)的分析表明, 灌溉水矿化度大于和小于土壤溶液浓度其调控措施截然相反。当矿化水用于非盐渍土时, 一般 $C_I > C_r$, 必然造成土壤积盐, 为了控制积盐, 应小定额灌水, 减少淋洗系数, 增大优先流系数; 当微咸水或淡水用于盐渍土时, 一般 $C_I < C_r$, 土壤积盐不会太大, 甚至脱盐。为了控制积盐, 增大脱盐, 则要加大灌水定额, 增大 f_2 , 减少 f_1 , 也即提高土壤的均匀渗透性, 达到洗盐的目的。由此表明, 因土施水是防止灌溉土壤次生盐渍化的重要控制措施之一。灌溉水量和灌溉水矿化度是入渗过程中, 土壤水盐状况的主要调控因子。为使土壤不积盐, 灌溉水矿化度应满足下式:

$$C_I \leq C_r \frac{f_2 [I(1 - f_1) - \Delta W]}{\Delta W + f_2 [I(1 - f_1) - \Delta W]} \quad (22)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{f_2 [I(1-f_1) - \Delta W]}{\Delta W + f_2 [I(1-f_1) - \Delta W]} \quad (23)$$

$$\text{令 } \eta = \alpha \frac{1000}{\theta_0} \quad (24)$$

$$\text{则 } C_l \leq \eta S_0 \quad (25)$$

暂称上式为灌溉水临界方程,称 η 为临界系数。 S_0 为土壤含盐量(g kg^{-1}),依据上式可求出不同 f_1, f_2, I 时的 η 值。

3 应用实例和临界淋洗系数的引入

3.1 灌溉水临界矿化度

以山西省永济灌溉试验⁽¹⁾为基础,根据田间实际灌溉经验,应用如下基本数据:

$\theta_s = 29.7(\%)$, $\theta_0 = 15(\%)$, $\gamma = 1.514(\text{T/m})$, $D = 50(\text{cm})$, $w_s - w_0 = 111.279(\text{mm})$

根据式(17)~(20),计算得表1。表1给出了不同优先流系数、不同淋洗系数和不同灌溉水量情况下的临界系数和土壤含盐量为 3g kg^{-1} 时的灌溉水临界矿化度值,可供灌溉时参考使用。由表可知,灌水量大小、土壤含盐量是最重要的影响因素。试验确定不同土壤的优先流系数和淋洗系数也是非常重要的。

表1 灌溉水矿化度临界系数及临界灌溉水矿化度表($C_l \leq \eta S_0$)

Table 1 Critical mineralization degree of irrigation water

优先流系数 Preferred flow coefficient	淋洗系数 Leaching coefficient	临界系数 Critical coefficient η			当土壤含盐量 $S = 3\text{g kg}^{-1}$ 时的临界灌溉水矿化度 Critical mineralization degree of irrigation water $C_l (\text{g L}^{-1})$						
		灌水量 Irrigation water volume $I (\text{mm})$									
f_1	f_2	40	60	90	120	150	40	60	90	120	150
0	0.75	8.338	13.660	28.831	37.253	42.611	2.501	4.098	8.649	11.176	12.783
	0.5	5.800	9.775	22.456	30.517	36.093	1.740	2.932	6.737	9.155	10.828
	0.3	3.605	6.229	15.570	22.411	27.638	1.082	1.687	4.670	6.723	8.291
0.1	0.75	7.560	10.961	25.276	34.378	40.200	2.268	3.288	7.583	10.313	12.060
	0.5	5.239	7.731	19.288	27.673	33.538	1.572	2.319	5.786	8.302	10.061
	0.3	3.245	4.864	13.086	19.907	25.189	0.973	1.459	3.926	5.972	7.557
0.25	0.75	5.585	9.291	18.489	28.831	35.519	1.676	2.787	5.547	8.649	10.655
	0.5	3.83	6.496	13.581	22.456	28.790	1.149	1.949	4.074	6.737	8.637
	0.3	2.352	4.012	8.871	15.570	20.879	0.705	1.204	2.661	4.671	6.264
0.5	0.75	4.330	6.373	9.295	13.660	22.511	1.299	1.912	2.789	4.089	6.753
	0.5	2.950	4.389	6.498	9.775	16.910	0.885	1.317	1.950	2.932	5.073
	0.3	1.801	2.704	4.057	6.229	11.291	0.540	0.811	1.217	1.869	3.387
0.7	0.75	2.642	3.901	5.769	7.560	9.291	0.792	1.173	1.731	2.268	2.787
	0.5	1.786	2.659	3.960	5.239	6.496	0.536	0.798	1.188	1.572	1.949
	0.3	1.084	1.621	2.434	3.245	4.055	0.325	0.486	0.730	0.974	1.217

(1) 山西省水利科学研究所. 山西省主要农作物需水量与灌溉制度总结. 1990

3.2 优先流系数

应用表 2 资料, 代入式 25 可求得表 3, 表 3 表明优先流系数随土层厚度及灌水量而变化, 而 β 值相对稳定, 仅受土壤初始含水量和其他基本水分物理性质的影响, β 值是否可作为储水特性指标还有待深入研究。

表 2 土壤储水特性计算基本资料表

Table 2 Basic data of soil moisture features

土层 D	初始含水量 θ_0	田间持水量 θ	饱和含水量 θ_s	$\theta - \theta_0$	$\theta - \theta_s$	容重 γ
Soil layer (cm)	Initial water content (%)	Soil field capacity (%)	Saturated soil water content (%)	$\theta - \theta_0$	$\theta - \theta_s$	Bulk density (g cm^{-3})
0~20	16.10	22.01	31.01	6.02	15.03	1.46
0~50	17.20	23.03	33.32	5.82	16.12	1.51
0~100	17.32	22.86	30.96	5.51	13.64	1.57

表 3 土壤储水特性表

Table 3 Storage features of upper soil layer

土层 D	土壤储水系数	$1 - f_1$	灌水量 I				
			Irrigation water volume				
			(mm)				
Soil layer (cm)	Soil coefficient β		40	60	90	100	150
0~20	1.1187	22.374 I	0.559	0.373	0.4022	0.186	0.149
0~50	1.095	54.75 I	(1.369)	0.913	0.608	0.456	0.365
0~100	1.108	110.8 I	(2.77)	(1.847)	(1.231)	0.923	0.739

3.3 实测灌溉水临界矿化度经验公式

应用逐次灌溉水矿化度和土壤灌前灌后含盐量测定数据, 点绘了灌前含盐量及灌溉水矿化度的散点图, 并绘制灌后含盐量等值线。将灌前含盐量与灌后含盐量相等的等值线交点数据整理为表 4。

表 4 灌溉前后盐分平衡点据表

Table 4 Measured data of soil salinity balance after irrigation

土层		灌水量 $I = 60\text{mm}$					
		Irrigation water volume					
Soil layer (cm)							
0~20	土壤含盐量 S_0 (g kg^{-1})	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
	灌溉水矿化度 C_I (g L^{-1})	3.5	5.2	5.3	8.0	7.3	8.3
0~50	土壤含盐量 S_0 (g kg^{-1})	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	—
	灌溉水矿化度 C_I (g L^{-1})	3.5	4.0	6.0	7.3	7.2	—

将 C_I 与 S_0 回归分析, 得经验性灌溉水矿化度临界回归方程

$$0\sim 20\text{cm 土层: } C_I = 1.087S_0 + 2.463, R = 0.931 \quad (26)$$

$$0\sim 50\text{cm 土层: } C_I = 1.176S_0 + 2.074, R = 0.954 \quad (27)$$

另一方面, 当 $I = 60\text{mm}$, $f_2 = 0.913$, $f_1 = 43.262$ 时, $C_I = 1.3036S_0$; 当 $S_0 = 3\text{g kg}^{-1}$ 时,

$C_l = 3.91 \text{ g L}^{-1}$ 。实测经验值 5.602 要比本文模型计算值 3.91 高。主要是由于天然降雨的淋洗作用所致。

3.4 临界淋洗系数

由式(24), 当 $\lambda_2 = 0$ 时, 临界淋洗系数

$$f_2 = - \frac{K_r}{(1 - f_1 - K_r)(1 - C_r)} \quad (28)$$

当优先流系数为零时, 由上式可求得临界淋洗系数如表 5 所列。

表 5 临界灌溉水矿化度及临界淋洗系数表

Table 5 Critical mineralization of irrigation water and critical leaching coefficient

土壤初始 含盐量 S_0 Initial soil salinity (g kg^{-1})	0~ 20(cm) 土层 Soil layer			0~ 50(cm) 土层 Soil layer		
	临界灌溉水 矿化度 Critical mineralization of irrigation water C_{l20} (g L^{-1})	土壤相对 浓度 C_{r20} Relative soil solution concentration	临界淋洗 系数 f_2^0 Critical leaching coefficient	临界灌溉水 矿化度 Critical mineralization of irrigation water C_{l50} (g L^{-1})	土壤相对 浓度 C_{r50} Relative soil solution concentration	临界淋洗 系数 f_2^0 Critical leaching coefficient
	1	3.55	1.878	0.480	3.25	2.051
2	4.637	2.875	0.225	4.426	3.013	(1.284)
3	5.724	3.494	0.169	5.602	3.570	(1.006)
4	6.811	3.915	0.145	6.778	3.934	0.881
5	7.898	4.220	0.131	7.954	4.191	0.810
6	8.985	4.452	0.122	9.13	4.381	0.765
7	10.072	4.633	0.116	10.306	4.528	0.733
8	11.159	4.779	0.112	11.482	4.645	0.709
9	12.246	4.900	0.108	12.658	4.740	0.691
10	13.333	5.000	0.105	13.834	4.819	0.677

4 结 语

1. 灌溉水携带盐分是土壤发生次生盐渍化的一个重要原因。本文针对田间实际, 引入优先流系数和淋洗系数, 建立灌溉水入渗淋洗模型, 淋洗系数和优先流系数是重要的水盐动态模型参数。

2. 通过对模型的讨论提出灌溉水临界矿化度方程, 认为因土施水是防止灌溉土壤次生盐渍化的重要控制措施之一, 灌溉水量和灌溉水矿化度是入渗过程中, 土壤水盐状况的主要调控因子。为使土壤不积盐, 灌溉水矿化度应满足临界灌溉水矿化度方程。应用式(17)可确定适宜的灌溉水矿化度。

3. 应用实际观测所得的灌溉水临界矿化度经验公式, 又引入了临界淋洗系数。运用表 5 数据作图, 即可以查得试验条件下 20cm 或 50cm 土层不同土壤含盐量时灌溉水临界矿化度, 以及相应的临界淋洗系数。

4. 今后, 还需进一步深入研究淋洗系数和优先流系数的变化规律, 使本文所提出的

入渗淋洗模型适用性更强。

致 谢 本工作在中国科学院水利部水土保持研究所康绍忠教授的精心指导下完成。

参 考 文 献

1. 刘亚平, 陈 川. 土壤非饱和带中的优先流. 水科学进展, 1966, 1: 57~ 60
2. 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 121~ 131
3. [美]简. 范席福加德主编. 胡家博译. 农业排水. 北京: 水利出版社, 1982. 312~ 315
4. 王遵亲等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993. 516~ 520

THE SIMPLIFIED MODEL OF SALT-WATER REGIME IN CROPLAND SOIL UNDER INFILTRATION CONDITION AND ITS APPLICATION

Zhang Miao-xian Yang Jing-song

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Summary

In this paper, the lower boundary flow of considered upper soil stratum was expressed into linear relation with infiltration ratio and saturated degree by introducing preferential flow coefficient. So according to principle of salt-water balance, the water deposit formula and salt deposit formula was conducted out by introducing leaching coefficient. Through discussing above formulas, the critical mineralization degree equation of irrigation water was presented. The physical significance and affected factors of the preferential flow coefficient and leaching coefficient were discussed. The salt-water regime model is simple and suitable for farmland irrigation management, the critical mineralization degree equation of irrigation water maybe provide reference for option of mineralization degree of irrigation water.

Key words Salt-water regime model, Critical mineralization degree equation, Irrigation water, Preferential flow coefficient, Leaching coefficient