

# 表层盐化土壤的灌溉淋洗需要量

王学锋 尤文瑞 王遵亲

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

## 摘 要

通过土柱模拟实验及数值模拟计算,探讨了灌溉淋洗需要量的确定方法,并初步给出了不同作物苗期及生育期的灌溉淋洗需要量。依各种作物耐盐性的不同,苗期灌溉淋洗需要量为  $191-1350\text{m}^3/\text{ha}$ ; 生育期灌溉淋洗需要量为  $690-3950\text{m}^3/\text{ha}$ 。此研究结果为土壤盐渍化的防治和进一步完善水资源的合理利用提供了理论依据。

**关键词** 入渗,灌溉,淋洗,溶质移动

黄淮海平原的盐渍土区,雨季土壤盐分被淋洗,表土盐分减少;但是,在春、秋降雨少、蒸发量大的季节,土壤返盐,形成表聚性很强的盐渍化土壤;这时,绝大多数盐渍化土壤剖面中土壤的平均含盐量并不高<sup>[1,2]</sup>。根据土壤盐分在土壤剖面中的变化规律,可以认为黄淮海平原大部分盐渍土壤并不需要专门的冲洗改良,而只要在灌溉时,适当加大水量来调节土壤剖面中盐分的分布,即可确保农作物不受土壤盐分的危害,同时又能满足作物的需水要求。这种具有双重作用、加大的灌溉水量,称为灌溉淋洗需要量(Irrigation Leaching Requirement),简记为 ILR (见图 1)

国外对灌溉需要量和淋洗需要量进行过较多的研究<sup>[4,5,7]</sup>,特别是美国盐土实验室,早在 50 年代就提出:

作物生长是土壤水分应力的函数,而土壤水分应力等于土壤水分张力与土壤溶液渗透压之和。通过灌溉设施可以使根区土壤水分张力保持在作物能够最佳利用土壤水分的状态,而通过淋洗又可以使根区土壤溶液的渗透压保持在作物正常生长可允许的水平。只有将灌溉、淋洗、排水三者同时考虑,才能获得最佳经济效益。

虽然我国许多地方均采用灌溉淋盐的方法,但因对 ILR 研究的较少,往往用水过量,形成灌溉水的浪费;有时,甚至使地下水位抬高,使土壤改良条件更加恶化。为了有效地利用水资源,节约用水,合理调节土壤盐分动态,有必要对 ILR 进行深入的研究。本文通过土柱模拟实验及数值模拟计算,研究了不同土壤含盐状况及不同作物苗期和生育期内

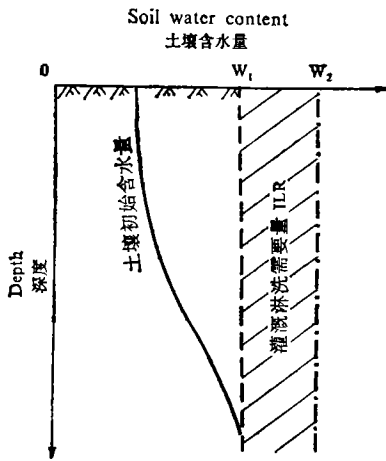


图 1 灌溉淋洗需要量计算示意图

Fig. 1 Sketch map of ILR

ILR 的确定方法,并提出 ILR 的参考数值。

## 一、供试土壤及试验方法

在河南省封丘县獐鹿市乡,采集质地相同,但含盐量不同的土样;按土样浸提液 EC 测定结果,选择其中两种(高含盐土和低含盐土)做为供试土壤;然后在室内安装具有盐分强表聚性的模拟土柱,即将

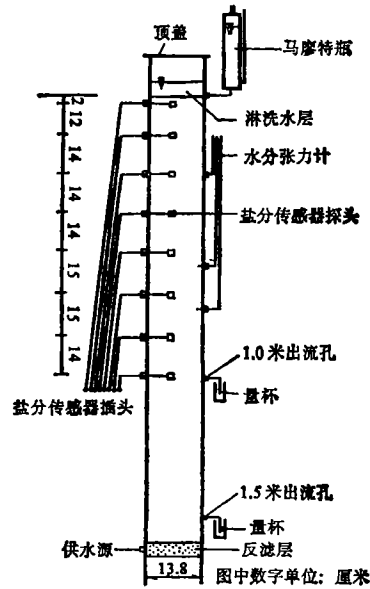


图 2 模拟土柱示意图

Fig. 2 Diagram of soil column model

表 1 供试土样的理化性质

Table 1 Selected physical and chemical characteristics of the soil samples

土样 Soil sample	pH	EC (25°C) (dS/m)	全盐 (g/kg) Total salt	土壤颗粒组成 Sand Silt Clay (g/kg)			阴阳离子含量 (cmol/kg soil) Ionic components						
				HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>			
高含盐土	7.51	6.25	33.0	514.4	375.2	73.2	0.24	21.77	8.36	0.99	5.00	2.84	24.06
低含盐土	8.02	0.145	1.22	495.2	395.2	77.2	0.33	0.03	0.06	0.43	0.26	0.09	0.22

表 2 入渗前土柱剖面状况及设计

Table 2 Some conditions of soil columns before leaching

土柱 Soil column No.	容重 Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	表土含盐量 Salt content of surface soil (g/kg)	心底土含盐量 Subsoil salt content (g/kg)	排水深度 Outlet depth (m)	润湿时间 Wetting period (day)	润湿后表土电导率 EC of surface soil after wetting (dS/m)
1	1.65	5.0	1.22	1.0	100	13.4
2	1.65	10.0	1.22	1.0	140	16.0
3	1.65	15.0	1.22	1.0	166	21.5
4	1.50	5.0	1.22	1.0	47	10.5

低含盐土壤装于土柱下层(2—150cm),将高含盐土壤装于土柱表层(0—2cm)。供试土壤的机械组成及化学性质见表1,淋洗实验开始前各土柱初始状况见表2,试验装置见图2。

实验室内分层填装四个具有不同表土含盐量的土柱(表2),在试验开始前,先从各土柱底部对土柱供蒸馏水;用 Mallot 瓶控制各土柱的潜水位,使其均处于距土壤表面100cm处;待水分向上浸润到达土壤表面后,开始安装盐分传感器和水分测压管,以监测土柱中土壤盐分和土壤水分的变化。此外,在每个土柱上端,安装 Mallot 瓶,用来连续补水并控制土壤表面淋洗水层厚度为5cm。土柱顶端用盖子封口,减少蒸发。

入渗试验开始后,连续监测各个土柱中盐分的变化情况,记录灌水量及出流量;待到土壤全剖面中土壤溶液电导率值稳定不变时,停止灌水。

## 二、结果和讨论

淋洗脱盐标准包含有两个指标:一是由作物耐盐性确定的脱盐土层内允许的含盐量;二是由作物根系活动层决定的脱盐土层厚度。根据以往的研究经验,取苗期脱盐土层厚度为30cm,作物的耐盐指标选用河南封丘县的试验结果<sup>[3]</sup>;作物生长期内,根系活动层加大,耐盐能力也增强,故生育期脱盐土层厚度取为100cm,而作物耐盐性选用美国盐土实验室提出的指标<sup>[7]</sup>。

### (一) 模拟试验结果

灌溉淋洗需要量(ILR)的确定,首先是利用模拟土柱试验所得到的土壤溶液电导率随时间变化曲线,求出苗期脱盐土层(30cm)和生育期脱盐土层(100cm)内土壤溶液电导率下降到脱盐标准所需要的淋洗时间,然后从累积供水量曲线上查出相应水量(图1的 $W_2$ ),再减去田间持水量(图1的 $W_1$ ),即可求出灌溉淋洗需要量ILR值。不同淋

表3 苗期和生育期不同作物的灌溉淋洗需要量(ILR)(单位:  $m^3/ha$ )

Table 3 ILR of different crops at seedling stage and growing period unit: $m^3/ha$

作物 Crop	作物耐盐度 <sup>1)</sup> Salt tolerance of the crop (dS/m)	苗期 (ILR) Seedling stage			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
向日葵	<8.9	191	326	496	990
高粱,棉花	<7.2	261	361	556	1095
小麦	<5.4	296	461	661	1155
水稻,玉米	<4.5	326	496	691	1215
大豆	<3.7	426	526	721	1350
		生育期 (ILR) Growing period			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
向日葵	<12	690	2295	2730	3247
高粱,棉花	<10	1325	2429	2997	3414
小麦	<8	1460	2562	3164	3581
水稻,玉米	<7	1525	2630	3264	3648
大豆	<4	1693	2997	3665	3950

1) 引自文献[3],以饱和土壤浸提液 ECe 计算; 2) 引自文献[7],以饱和土壤浸提液 ECe 计算。

洗脱盐标准条件下的 ILR 试验结果见表 3。

从表 3 可以看出: 第一, 尽管各种作物苗期的耐盐度变化较大, 从 8.9—3.7dS/m, 数值相差一倍以上, 但除了一号土柱外, 其它土柱试验所得的 ILR 值相差不大, 初始表土的含盐量越高(见表 2), 差异越小。这是由于在轻质地土壤剖面、且心底土含盐量又低的条件下, 表层土壤盐分较易被冲洗, 而且苗期作物对脱盐土层厚度要求较浅, 易于达到淋洗脱盐标准, 因此对于不同表土含盐量的土柱, 所需的 ILR 值相差不大。进一步分析这种现象产生的机制在于: 在本试验条件下, 在淋洗过程中, 当表层土壤含盐量不同时, 使土层饱和并溶解盐分所需的水量相差不大; 差别仅在于使盐分携带出脱盐土层所需的水量, 而作物苗期所要求的脱盐土层厚度不大, 因此, 这部分水量亦小, 因而使总的 ILR 值差别不大。第二, No. 4 土柱所需的 ILR 值, 明显比其它土柱高, 但在灌水淋洗开始之时, 它的表层土壤溶液电导率只有 10.5dS/m, 又明显比其它土柱低。比较各土柱从灌水淋洗到出流开始所需时间可以看出, No. 4 土柱出流最快, 在相同时间内 No. 4 土柱的出流量最多。由此分析该土柱 ILR 值较高的原因是由于其土壤容重小于其它土柱, 土壤孔隙多, 使得灌溉水流下渗的速度较快, 入渗水和原土壤溶液还没有达到扩散平衡即已下渗, 使单位体积水量的淋盐效率下降, 故试验所得的 ILR 值较大。因此, 在盐渍土淋洗改良过程中, 不宜连续积水冲洗, 应使入渗水在土壤中有足够的停留时间, 以充分溶解土壤盐分; 或者控制排水出流速度, 以使入渗水在土壤中充分溶解土壤盐分。这样不仅可以提高灌溉淋洗用水的排盐效率, 而且可以节约用水。第三, 随着作物生育期所要求的脱盐土层厚度的增加, 灌溉淋洗需要量也大幅度增加。根据王学锋等人(1991 年)的研究<sup>[6]</sup>, 土壤盐分含量的峰值(简称“盐峰”)在土壤剖面中的下移速度  $v$  值, 随土壤深度的增加, 如从 2—28cm, 28—42cm, 42—71cm, 71—100cm 时,  $v$  值分别为 0.81, 0.48, 0.27, 0.12(cm/h), 即盐峰运行相同的距离, 在土壤底层要比在土壤上层需要更多的时间。这就增加了灌溉淋洗所需要的时间, 也就极大地增加了作物生育期所需的 ILR 值。

## (二) 数值模拟结果

在水分入渗条件下的盐分移动, 可用均匀介质中饱和一维流溶质运移方程来描述, 因此本试验过程中描述盐分运动的方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - v \frac{\partial C}{\partial Z} + S \quad (1)$$

式中:  $D' = D_{i,k}/\theta_s$ , 其中  $D_{i,k}$  为水动力弥散系数,  $\theta_s$  为饱和土壤含水量;  $v$  为土柱中水流运动的平均速度,  $S$  为源汇项。

利用有限差分法对上述方程差分, 即可用计算方法求出土壤溶液浓度 ( $C$ ) 随时间 ( $T$ ) 变化的函数关系, 进而求出 ILR 值。

为消除差分过程中的数值弥散现象, 采用高阶差分格式 (Crank-Nicolson 格式) 对上述方程差分, 得差分方程如下:

$$\frac{C_{k,j+1} - C_{k,j}}{\Delta t} = D' \left[ \frac{C_{k+1,j+1} - 2C_{k,j+1} + C_{k-1,j+1}}{2\Delta Z^2} + \frac{C_{k+1,j} - 2C_{k,j} + C_{k-1,j}}{2\Delta Z^2} \right] - v \left[ \frac{C_{k,j+1} - C_{k-1,j+1}}{2\Delta Z} + \frac{C_{k,j} - C_{k-1,j}}{2\Delta Z} \right] + S$$

令  $r = \Delta t / \Delta Z^2$  为步长比, 展开上式并整理得:

$$\begin{aligned} & \frac{D'r}{2} C_{k+1,j+1} - \left[ D'r + \frac{v\Delta Zr}{2} + 1 \right] C_{k,j+1} + \left[ \frac{D'r}{2} + \frac{v\Delta Zr}{2} \right] \times C_{k-1,j+1} \\ & = -\frac{D'r}{2} C_{k+1,j} + \left[ D'r + \frac{v\Delta Zr}{2} - 1 \right] C_{k,j} - \left[ \frac{D'r}{2} + \frac{v\Delta Zr}{2} \right] \times C_{k-1,j} + S \quad (2) \end{aligned}$$

当边界条件(上边界  $C_{0,j}$  和下边界  $C_{N,j}$ )已知及参数  $D'$  值确定后, 偏微分方程(1)的差分格式是可解的。本计算中采用以下处理:

(1) 将土柱表层 2cm 厚的高含盐土做为盐分补给源, 在初始时段内,  $C_{0,j}$  按直线递减关系供给盐分; 表层盐分完全下移后,  $C_{0,j}$  按零处理。

(2) 下边界条件  $C_{N,j}$ , 假定为无限深处土壤溶液的电导率值, 对上层土壤溶液浓度变化的影响很小, 可取  $C_{N,j} = 0$ ; 在实际计算中, 只要取土层厚度  $N = 4$  m, 即可达到上述目的(即  $C_{N,j} = 0$ )。

(3) 水动力弥散系数的选定: 参照清华大学水利系(1983)应用水平土柱入渗法测得的水动力弥散系数结果<sup>1)</sup>, 选取相同土壤质地及容重条件下的  $D_{i,h}$  值为  $1.21 \text{ cm}^2/\text{h}$ 。因  $D_{i,h}$  值随土壤含水量而变化, 本试验为土壤饱和条件下的盐分运移, 故将所取  $D_{i,h}$  值除以饱和含水量后应用于计算。

数值模拟计算结果详见表 4。

表 4 计算所得不同作物苗期灌溉淋洗需要量(ILR)(单位:  $\text{m}^3/\text{ha}$ )

Table 4 ILR of different crops at seedling stage by numerical procedure (unit:  $\text{m}^3/\text{ha}$ )

作物 Crop	作物耐盐度 <sup>1)</sup> Salt tolerance of the crop	苗期 (ILR) Seedling stage			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
向日葵	<8.9	102	219	365	476
高粱, 棉花	<7.2	165	285	515	532
小麦	<5.4	221	388	677	882
水稻, 玉米	<4.5	388	514	744	1277
大豆	<3.7	464	540	870	1488

1) 引自文献[3], 以饱和土壤浸提液  $\text{EC}_e$  计算。

将模拟试验结果与数值计算推求结果(见表 3, 4)比较可以看出: 对于淋洗标准较高的作物, 计算结果与试验结果拟合较好, 而对耐盐性较高的作物(如向日葵), 计算结果略低。主要原因是土柱淋洗开始时, 表层土壤溶液电导率与耐盐较高作物的允许土壤溶液浓度值较接近, 致使在计算中很短的淋洗时间即达到淋洗标准。

### 三、结 论

由于作物苗期对脱盐土层厚度要求较浅, 在心底土含盐很少的条件下, 表层土壤盐分

1) 清华大学水利系, 1983: 水平入渗条件下非饱和土壤水盐运动的分析及土壤水盐运动综合扩散系数  $D_{i,h}(\theta)$  的测定。

迅速溶解下移,故对于不同的淋洗脱盐标准,所需的灌溉淋洗需要量相差不大;在入渗水量达到一定程度时,适当增加一部分水量,即可使土壤溶液浓度成倍地下降。在表土含盐量相同的情况下,作物耐盐性高的 ILR 值小,而作物耐盐性低的则 ILR 值大。对于同一种作物,随表土含盐量的增加,ILR 值也增大。从高耐盐性的向日葵到低耐盐性的大豆,当表土含盐浓度分别为 13.4,16.0,21.5dS/m 时,苗期的 ILR 值变化范围分别是 191—426,326—526,496—721m<sup>3</sup>/ha;生育期的 ILR 值变化范围分别是 690—1693,2295—2997,2730—3665m<sup>3</sup>/ha。与表土含盐量相比,土壤容重对 ILR 值的影响更大。当土壤容重降低而使淋洗水流渗流速度加快时,不同作物的 ILR 值均大量增加。因此,在盐渍上的淋洗改良过程中,如能控制排水,使入渗水在土壤中有足够的停留时间,则可以提高灌溉淋洗的排盐效率。

数值模拟计算的结果与试验结果拟合的较好,为实践中应用微机计算确定灌溉淋洗需要量提供了方法。

本试验所确定的 ILR 值为土柱模拟及数值模拟计算结果,需进一步通过大田实验的验证,才能用于生产实践。

### 参 考 文 献

1. 中国科学院南京土壤研究所,1978: 中国土壤。科学出版社。
2. 尤文瑞等,1985: 蒸发条件下非饱和粉砂壤土水盐动态,俞仁培主编《土壤水盐动态及盐碱化防治》。科学出版社。
3. 曾宪修,1985: 河南封丘盐渍土与作物耐盐度。俞仁培主编《土壤水盐动态和盐碱化防治》。科学出版社。
4. Dutt, G. R., R. W. Terbelbout and R. J. Rauschkolb, 1972: Prediction of gypsum and leaching requirement for sodium-affected soils. *Soil Sci.* 114: 93—103.
5. Keller, I and J. F. Alfaro, 1966: Effect of water application rate on leaching, *Soil Sci.* 102: 107—116.
6. Wang X. F., W. R. You and Z. Q. Wang, 1991: Salt water dynamics in highly salinized topsoil of salt-affected soil during water infiltration. *Pedosphere* 1: 315—323.
7. US Salinity Laboratory Staff, 1954: Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. US Dept. Agric. Handbook No. 60.

## IRRIGATION LEACHING REQUIREMENT OF SALT-AFFECTED SOIL WITH A HIGHLY SALINIZED SURFACE HORIZON

Wang Xuefeng, You Wenrui and Wang Zunqin  
(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008*)

### Summary

The vertical distribution of salt in the soil profile in the salt-affected areas of the Huang-Huai-Hai Plain is characterized by intensive salt accumulation at the soil surface and its rapid changes with seasons. To regulate salt distribution in the soil profile, an additional fraction of irrigation water, other than leaching specially, would let crops stand to survive. The additional amount of water is called Irrigation Leaching Requirement (ILR). By soil column experiments and numerical procedure, a method to ascertain the minimum amount of ILR is discussed, Results of ILR under different salt conditions are given. Based on salt tolerance of crop, ILR changed from 191 to 1350 m<sup>3</sup>/ha at seedling stage, and from 690 to 3950 m<sup>3</sup>/ha in growing period. The paper provides an approach to reclaiming salt-affected soil and making efficient use of water resources.

**Key words** Infiltration, Irrigation, Leaching, Solute movement