

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.02-02

# 基于 HYDRUS-2D 模拟暗管排水条件下 分区淋洗对土壤盐分分布的影响

余 扬<sup>1,2</sup>, 许伟健<sup>3</sup>

(1. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌, 330029; 2. 江西润泽工程咨询有限公司, 江西 南昌, 330029;  
3. 昆山市水务局, 苏州 昆山, 215300)

**摘 要:** 为探究暗管排水条件下分区淋洗对土壤盐分分布的影响,以沿海盐碱地区为研究区域,选定典型试验地进行现场试验,利用现场试验数据率定了 HYDRUS-2D 模型参数并验证了模拟暗管排水的准确性,运用验证后的模型模拟了不同分区淋洗情况下的土壤盐分分布。模拟结果表明:HYDRUS-2D 能够较好地模拟暗管排水条件下的土壤盐分分布。在暗管排水条件下,非分区淋洗土壤盐分分布均匀性较差,利用分区淋洗可以极大的提高土壤盐分淋洗的均匀性,在 5 种模拟情景中,F4 模拟情景的土壤盐分淋洗均匀性最好,100cm 土层的最大与最小含盐量差值仅 0.79g/kg。

**关键词:** 分区淋洗;暗管排水;海滨盐碱地;水盐运移;HYDRUS-2D

**中图分类号:** S278      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-4701(2021)02-0087-07

## 0 引 言

盐碱地在全球广泛分布,其面积约  $10^9\text{hm}^2$ ,我国盐碱地面积约  $10^8\text{hm}^2$ ,约占世界盐碱地面积的 1/10<sup>[1,2]</sup>。在中国沿海地区因其特殊的地理位置与特定的自然环境,地下水位较浅、矿化度较高,加之蒸发量大、降雨少且年内分配不均,导致大面积沿海地区形成盐碱地,大面积盐碱地的存在严重破坏了当地生态环境,制约着当地经济发展<sup>[3,4]</sup>。

随着对盐碱地改良研究的逐步加深,暗管排水技术被提出并广泛应用到盐碱地改良当中。塔吉姑丽·达吾提等<sup>[5]</sup>以新疆生产建设兵团第一师二团为研究区域,通过暗管排水试验研究了暗管不同管径和间距对农田排水水质的影响,并确定了暗管埋设间距 600cm、管径 6cm 时当地土壤洗盐效果较好。窦旭等<sup>[6]</sup>探讨了暗管排水条件下不同春灌定额对盐渍化灌区土壤水盐分布的影响,确定了灌水量应在常规基础上减少 10%,并结合

暗管排水技术是当地最为适宜的灌溉模式。庄旭东等<sup>[7]</sup>研究了内蒙古河套灌区暗管排水条件下作物根系层水分通量和盐分通量的变化,确定了适宜当地农田排水的暗管规格为暗管埋深 200cm、暗管间距 4500cm。李显激等<sup>[8,9]</sup>为降低新疆地区盐碱棉田根区土壤盐分含量,利用 HYDRUS 软件和田间试验数据对所建立的数值模型和水盐运移参数进行了校验,并利用建立的数值模型和相关水盐运移参数描述暗管排水、排盐过程中的土壤水盐动态。Karandish<sup>[10]</sup>等通过试验数据校准和验证了 HYDRUS 模型,并利用验证后的模型确定了珠江三角洲农业生产在不同情况下的最佳灌水量。国内外众多学者对暗管技术应用于盐碱地治理做了大量研究,众多研究表明在暗管布设下土壤盐分淋洗后分布不均匀,水平距离距暗管越近的土壤剖面含盐量越低,距离暗管一半间距的剖面是暗管控制区域排水和排盐效果最差的剖面,因此为提高土壤整体的淋洗效果,使土壤层盐分均匀降低,提出分区淋洗提升暗管排水条件下土壤淋洗的均匀性,并通过 HYDRUS 模拟软件模

收稿日期:2021-01-04

作者简介:余 扬(1991- ),男,大学本科,助理工程师。

拟了不同分区淋洗情况下的土壤水盐运移, 深入分析模拟结果, 确定了分区淋洗下的最佳淋洗水量, 为改善暗管排水条件下土壤淋洗的不均匀性提供了可靠的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 现场试验

#### 1.1.1 试验区概况

试验区位于江苏省沿海重盐碱地区内, 试验区由滨海潮滩盐土形成, 土壤母质含盐量较高, 土壤含有较多的贝壳侵入体, 土壤质地为粉砂质壤土。

#### 1.1.2 试验简介

试验区总面积 4 400cm×7 800cm, 区域内共设 2 个小区。每个小区布设 7 根排水暗管, 暗管间距 600cm, 埋深 120cm, 坡降 2‰, 排水暗管采用管径 6cm 的带孔 PVC 波纹管。集水管采用管径 20cm 的无孔 PVC 波纹管。渗透水流通过排水暗管收集后流入集水管, 由集水管排至市政雨水管网。在暗管外围铺设一周碎石, 防止暗管进水孔被土壤小颗粒堵塞。试验区四周垒土墙高约 15cm, 防止淋洗水发生地表径流。试验区平面布置如图 1 所示。

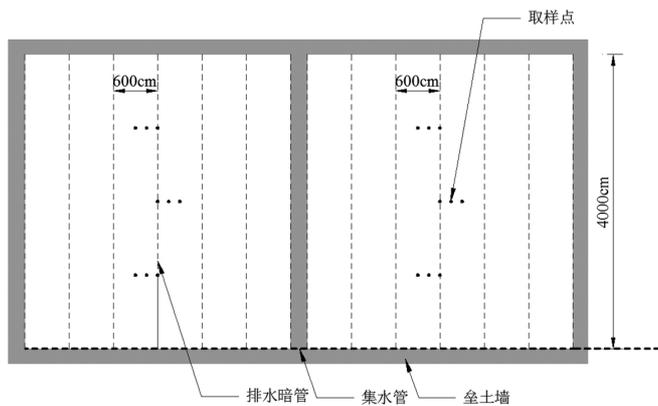


图 1 试验区平面布置图

淋洗水采用当地自来水, 灌水端安装流量计与阀门进行灌水量统计与控制。试验期为 2020 年 4 月 1 日至 4 月 21 日, 小区 1 与小区 2 灌水强度分别为 3cm/d 与 4cm/d。

#### 1.1.3 土壤取样与物理参数确定

2020 年 4 月 1 日进行第一次取样, 确定试验初始条件, 每个小区内进行三个重复的随机取样。2020 年 4

月 21 日进行第二次取样, 确定试验结果, 取样点如图 1 所示。取样利用土钻分 5 层进行, 每层取样厚度为 20cm, 总取样深度 100cm。

土壤粒径采用激光粒度分析仪 (LS230 型激光粒度仪, 贝克曼库尔特公司, 美国) 测定; 土壤容重利用环刀法测定; 土壤含盐量由电导率法测得数据按照公式 (1) 计算获得; 土壤含水量采用烘干法测定。试验区含水率和含盐量初始值如表 1 所示, 土壤物理参数如表 2 所示。

$$Q = \begin{cases} \frac{EC-0.086}{3.022} \times 10 & EC > 0.3 \\ \frac{EC}{3.022} \times 10 & EC \leq 0.3 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为土壤含盐量, g/kg;  $EC$  为土壤电导率, ms/cm。

表 1 试验区初始含水率与含盐量数据表

深度/cm	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
含水率/(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.259 6	0.294 1	0.330 4	0.346 1	0.369 0
含盐量/(g/kg)	39.27	31.04	28.69	25.74	19.98

表 2 试验区土壤物理参数表

质地	容重/(g/cm <sup>3</sup> )	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%
粉砂质壤土	1.46	21.37	57.94	20.69

## 1.2 数值模拟

### 1.2.1 土壤水分运动基本方程

以质量守恒定律及达西定律为基础, 认为土壤为二维各向同性介质, 且不考虑土壤中水分的滞后效应、温度及空气对水分运动造成的影响, 故土壤水分运动采用二维饱和-非饱和水流模型进行模拟。水流控制方程为二维 Richards 方程<sup>[11,12]</sup>:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $x$  为横向坐标;  $z$  为垂向坐标, 规定  $z$  向下为正;  $\theta$  为土壤含水率, cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>;  $\varphi$  为基质势, cm;  $t$  为入渗时间, d;  $K(\theta)$  为非饱和导水率, cm/d。

对于式 (2) 中的  $\theta$ 、 $\varphi$  与  $K(\theta)$  的求解使用 van

Genuchten-Mualem 方程<sup>[11,12]</sup>:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha\varphi|^n]^m} \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_s \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

式中:  $\theta_r$  为残余含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_s$  为饱和含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\alpha$ 、 $n$  和  $m$  为经验参数;  $m=1-1/n$ ,  $n>1$ ;  $K_s$  为饱和导水率,  $\text{cm}/\text{d}$ ;  $S_e$  为有效饱和度。

### 1.2.2 土壤溶质运移模型

溶质运移采用标准对流弥散方程<sup>[11,12]</sup>:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - q_i C \right) \quad (6)$$

式中:  $i, j$  为  $x, z$  轴坐标,  $C$  为溶液浓度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $D_{ij}$  为水动力弥散系数,  $\text{cm}^2/\text{d}$ ;  $q_i$  为水流流速,  $\text{cm}/\text{d}$ 。

### 1.2.3 定解条件

土壤水分运动方程的初始条件:

$$\theta(x, z, t) = \theta_0(x, z) \quad t=0, 0 \leq x < X, 0 \leq z < Z \quad (7)$$

式中:  $\theta_0(x, z)$  为土壤初始含水量分布, 根据初始实测值设置。

土壤溶质运移方程的初始条件:

$$C(x, z, t) = C_0(x, z) \quad t=0, 0 \leq x < X, 0 \leq z < Z \quad (8)$$

式中,  $C_0$  为土壤初始含盐量,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $z$  为土壤空间坐标, 取向向下为正, 根据初始实测值设置。

边界条件: 水分上边界条件为定通量边界; 左右边界正负通量近似相等, 设为零通量边界; 暗管为渗出面边界; 在暗管排水作用下, 距暗管 150cm 以下地下水流线近似水平, 垂直通量可忽略, 故下边界设置为零通量边界<sup>[13-15]</sup>。溶质边界条件与水分边界条件相对应, 定通量边界、渗出面边界与零通量边界处的溶质边界条件同为第三类溶质边界条件。

### 1.2.4 模型率定与验证方法

土壤水力特性参数利用 HYDRUS-2D 中内嵌工具根据土壤容重和粒径分布推求。选取小区 1 的试验数据用于模型的参数率定, 选取小区 2 的试验数据用于模型验证, 通过计算实测值与模拟值的均方根误差 (RMSE)、决定系数 ( $R^2$ ) 和纳什效率系数 (NSE) 进行模型精度评价并确定模型最终参数值<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型率定及验证结果

模拟采用二维模拟, 模拟时间等于试验时间。利用小区 1 试验数据率定后的模型参数如表 3 所示。将率定后的参数用于小区 2 进行数值模拟, 模型率定及验证精度见图 2 与图 3 所示。

表 3 模型参数

参数	数值
饱和含水率 $\theta_j/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.397 5
残余含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.066 7
进气值倒数 $\beta/(\text{cm}^{-1})$	0.006 0
经验参数 $n$	1.618 8
饱和导水率 $K_s/(\text{cm}/\text{d})$	6.62
纵向弥散系数/ $\text{cm}$	10
横向弥散系数/ $\text{cm}$	1
自由水中分子扩散系数/ $(\text{cm}^2/\text{d})$	1.632

由图 2 和图 3 可知, 土壤含盐量  $R^2$  为 0.940 0~0.999 7, NSE 为 0.788 0~0.962 0, RMSE 为 0.034 7~1.165 6  $\text{g}/\text{kg}$ 。可见, 模型精度较高, 模拟值与实测值较为吻合, 因此运用数值模拟进行暗管布设下水盐运移的模拟是可靠的。

### 2.2 模型应用

#### 2.2.1 分区淋洗参数选取

由图 5 (a) 可以看出同土层距离暗管越近的土壤剖面含盐量越低, 而距离暗管越远的土壤剖面含盐量越高, 并且土层越深含盐量差距越大。为实现在暗管排水情况下同深度土壤盐分的均匀降低, 将上表面每隔 100cm 划分为一个淋洗区域, 同一淋洗区域淋洗灌水强度相同, 分区情况见图 4 所示。以总淋洗用水量一定的原则, 将淋洗水量阶梯式分布于上边界, 距离暗管越远的区域分配更多的淋洗水量, 以每次淋洗的最终结果调整上边界淋洗水量分配, 共设定 5 种模拟情景, 具体模拟情景与淋洗灌水强度对应情况见表 4 所示。

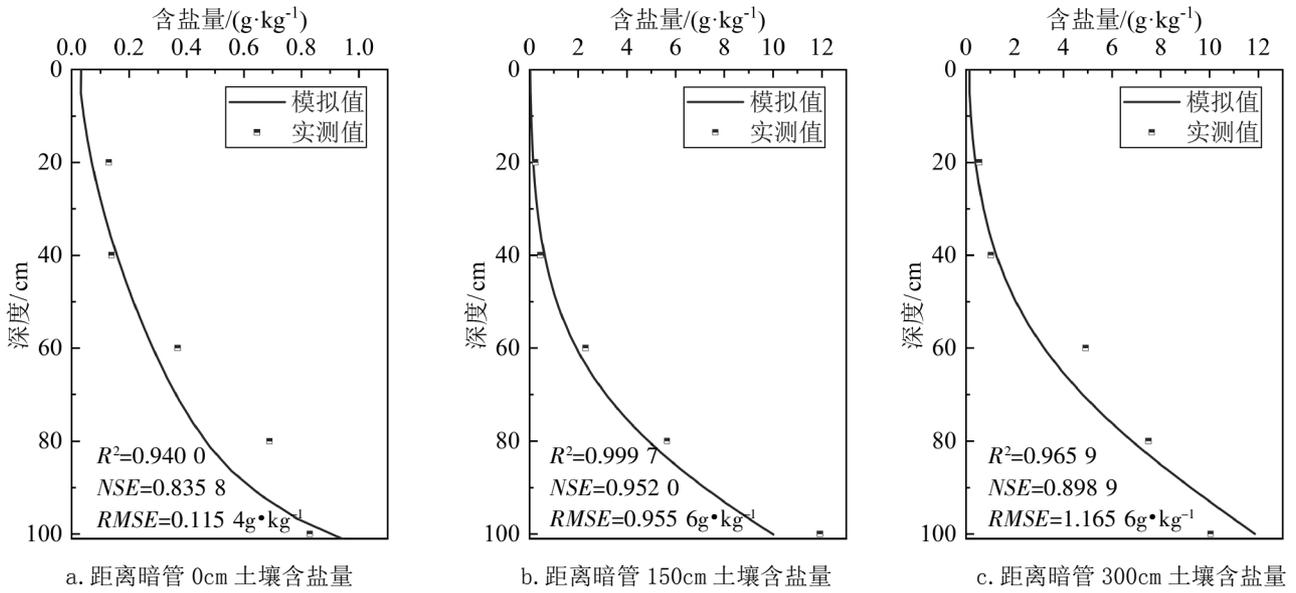


图2 3cm/d 灌水强度各剖面土壤含盐量

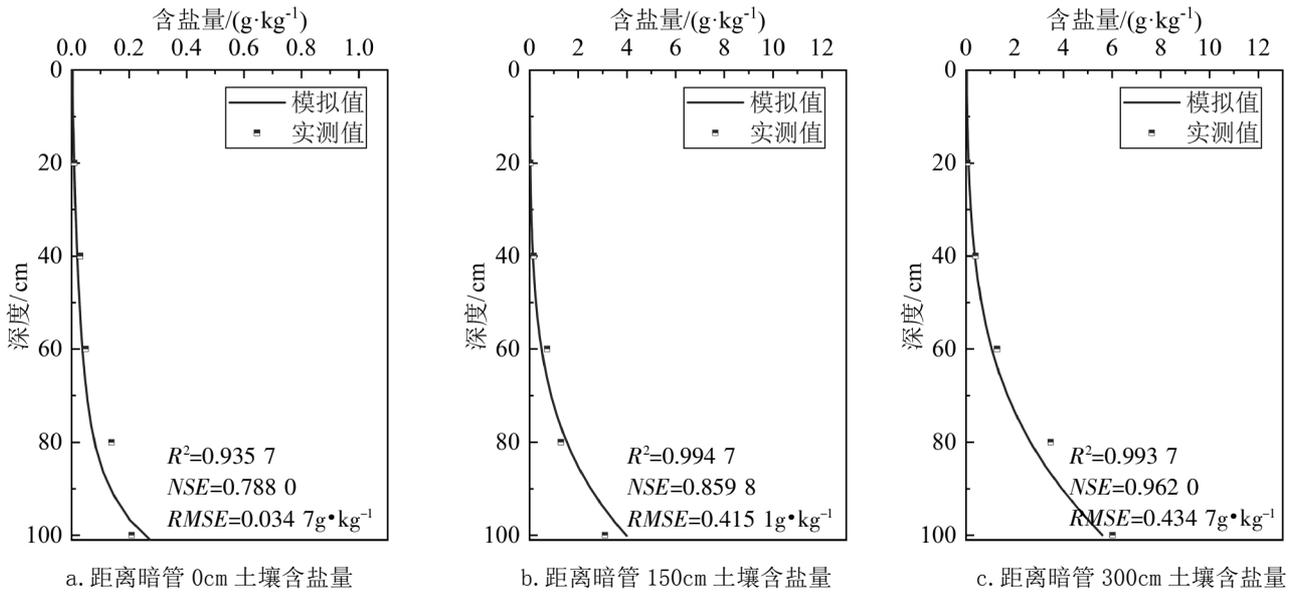


图3 4cm/d 灌水强度各剖面土壤含盐量

表4 模拟情景与分区淋洗参数情况对照表

模拟情景	分区1 淋洗灌水强度	分区2 淋洗灌水强度	分区3 淋洗灌水强度
CK	4	4	4
F1	3	4	5
F2	2	4.5	5.5
F3	1.5	4.75	5.75
F4	1	5	6

cm/d

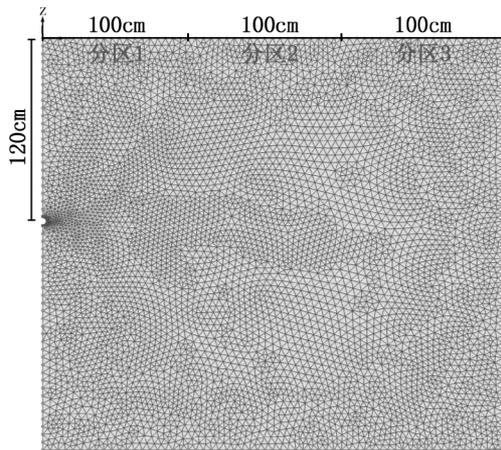
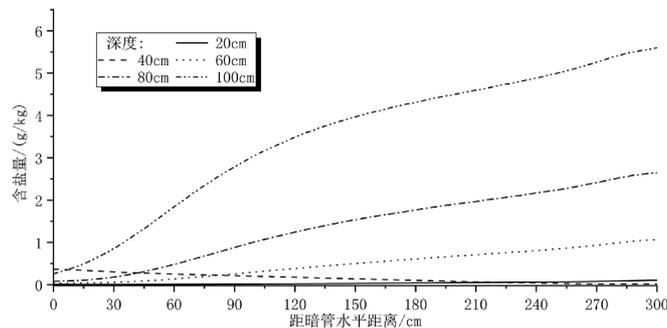


图 4 分区淋洗区域划分示意图

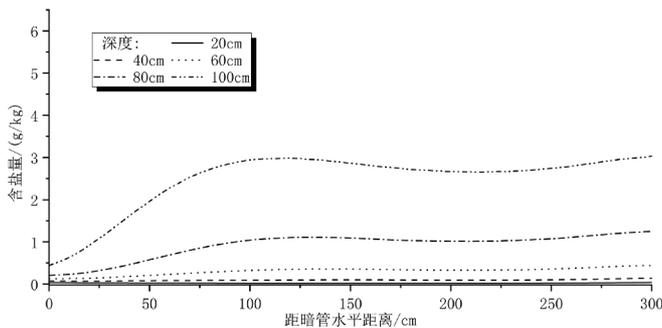
### 2.2.2 分区淋洗对土壤盐分分布的影响

运用验证后的模型对表 4 中的模拟情景进行数值模拟。模拟淋洗 20 天,输出 20、40、60、80、100cm 深度的土壤含盐量结果见图 5 所示。

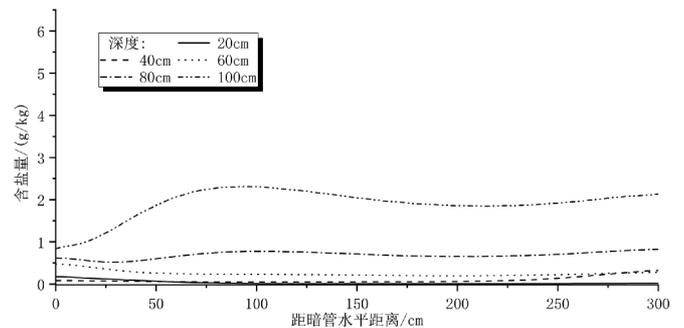
由图 5(a)可以看出上边界三个分区灌水量相同的情况下,深层土壤含盐量距离暗管 300cm 位置远高于 0cm 位置。由图 5(b)、(c)、(d)、(e)可以看出通过调整上边界淋洗水分分配可以很好的提高各土层盐分淋洗的均匀性。深度越大的土层在暗管影响下其淋洗均匀性越差,因此选择 100cm 深度土层探讨分区淋洗对土壤盐分分布的影响,图 5(a)中 100cm 土层淋洗后土壤含盐量最高为 5.60g/kg,最低为 0.03g/kg,差值为



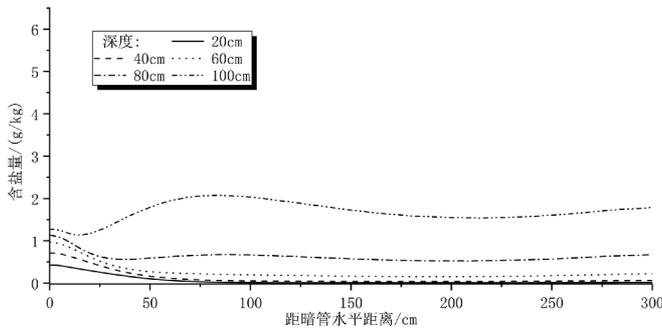
(a)CK 模拟情景土壤盐分分布情况



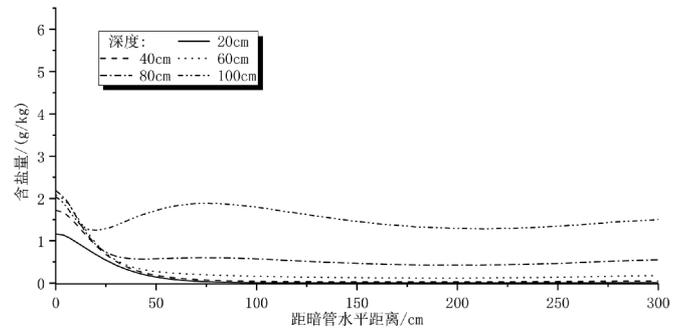
(b)F1 模拟情景土壤盐分分布情况



(c)F2 模拟情景土壤盐分分布情况



(d)F3 模拟情景土壤盐分分布情况



(e)F4 模拟情景土壤盐分分布情况

图 5 不同模拟情景土壤盐分分布情况

5.57g/kg, 图 5(b)中 100cm 土层淋洗后土壤含盐量最高为3.03g/kg, 最低为 0.43g/kg, 差值为 2.60g/kg, 图 5(c)中 100cm 土层淋洗后土壤含盐量最高为 2.13g/kg, 最低为0.83g/kg, 差值为 1.3g/kg, 图 5(d)中 100cm 土层淋洗后土壤含盐量最高为 2.07g/kg, 最低为 1.13g/kg, 其差值为0.94g/kg, 图 5(e)中 100cm 土层淋洗后土壤含盐量最高为 2.03g/kg, 最低为 1.24g/kg, 差值为 0.79g/kg, 可以看出合适分区淋洗水量既可以降低同层土壤盐分的最高值, 也可以增加土壤盐分的最低值, 致使同层土壤盐分变化区间缩小, 极大的提升了土壤淋洗的均匀性, 并且发现当分区 1 水量降低至 1cm/d 时, 100cm 土层最大土壤含盐量出现在了距离暗管最近的位置, 表明当距离暗管最近的小区水分分配过少也会导致土壤淋洗均匀性下降。

### 3 结 论

(1) 利用现场试验数据验证了 HYDRUS-2D 模型可以准确的模拟暗管布设下土壤盐分的变化情况, 根据模型模拟结果发现, 暗管排水条件下, 未分区淋洗存在淋洗后土壤盐分空间分布均匀性较差的问题。

(2) 分区淋洗可以极大的提高暗管布设下土壤淋洗的均匀性, 使土壤剖面的盐分均匀下降, 在 5 种模拟情景下, F4 情景淋洗均匀性最好, 100cm 土层土壤盐分最大与最小值之差最小, 为 0.79g/kg。实际运用时, 建议参照 F4 分区淋洗情景进行灌水强度的确定。

#### 参考文献:

- [1] LITALIEN A, ZEEB B. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134235.
- [2] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. *世界林业研究*, 2018, 31(04): 70-75.
- [3] 邓玲, 魏文杰, 胡建, 等. 不同洗盐方式对滨海盐碱地的改良效果[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(S2): 110-114.
- [4] 徐成龙, 董奕岑, 卢家磊, 等. 我国滨海盐碱地土壤改良及资源化利用研究进展[J]. *世界林业研究*, 2020, 33(06): 68-73.
- [5] 塔吉姑丽·达吾提, 罗浩, 吕双庆, 等. 暗管排水条件下南疆农田排水矿化度和电导率的动态变化研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 80-87.
- [6] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 暗管排水条件下春灌定额对土壤水盐运移规律的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 318-328.
- [7] 庄旭东, 冯绍元, 于昊, 等. SWAP 模型模拟暗管排水条件下土壤水盐运移[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(08): 93-101.
- [8] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 I: 模型与参数验证 [J]. *水利学报*, 2016, 47(04): 537-544.
- [9] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 II: 模型应用 [J]. *水利学报*, 2016, 47(05): 616-625.
- [10] KARANDISH F, SIMUNEK J. An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208, 67-82.
- [11] SIYAL AA, SKAGGS TH, VAN GENUCHTEN MT. Reclamation of Saline Soils by Partial Ponding: Simulations for Different Soils [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 486-495.
- [12] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 115-124.
- [13] 钱颖志, 朱焱, 伍靖伟, 等. 考虑排盐和控盐的干旱区暗管布局参数研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 74-83.
- [14] MIRJAT MS, MUGHAL AQ, CHANDIO AS. Simulating water flow and salt leaching under sequential flooding between subsurface drains [J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63(1): 112-122.
- [15] FAN Y, HUANG N, ZHANG J, et al. Simulation of Soil Wetting Pattern of Vertical Moistube-Irrigation [J]. *Water*, 2018, 10(5): 601.

编辑: 张绍付

## Effects of partition leaching on soil salinity distribution under subsurface drains based on HYDRUS-2D

YU Yang<sup>1,2</sup>, XU Weijian<sup>3</sup>

(1. China Railway Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Group Co.,Ltd., Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Runze Engineering Consulting Co.,Ltd., Jiangxi Nanchang 330029, China; 3. Water Affairs Bureau of Kunshan City, Suzhou Kunshan 215300, China)

**Abstract:** In order to study on the effect of partition leaching on soil salinity distribution in subsurface drains, field experiment was set up in typical experimental area selected from Coastal saline area. The simulation effect of HYDRUS-2D was verified by experimental data calibration, and salinity distribution of different partition leaching parameters was simulated by the validated model. The simulation results showed that HYDRUS-2D can well simulate the soil salt distribution under the condition of subsurface drains, and under the condition of uniform leaching, the soil salt distribution under the effect of subsurface drains was low in uniformity, the uniformity of soil salt leaching can be greatly improved by partition leaching. Among the 5 simulation scenarios, the soil salt leaching uniformity was the best under the F4 simulation scenario with the partition leaching and irrigation water ration. The difference between the maximum and minimum soil salinity in the 100cm soil layer was only 0.79g/kg.

**Key words:** partition leaching; subsurface drains; coastal saline soil; water-salt migration; HYDRUS-2D

翻译: 余 扬

---

## 胡春华在江西督导春季农业生产工作

中共中央政治局委员、国务院副总理胡春华 2021 年 3 月 17 日至 19 日在江西省九江市实地督导春季农业生产工作。他强调,要深入贯彻习近平总书记重要指示精神,认真落实全国两会部署,毫不放松抓好春季农业生产,为完成全年粮食产量保持在 1.3 万亿斤以上目标任务夯实坚实基础,牢牢把住粮食安全主动权。

水利部部长李国英、国务院副秘书长高雨、农业农村部副部长张桃林、乡村振兴局局长王正谱随同调研;省领导刘奇、易炼红、叶建春、胡强、罗小云分别陪同调研。

在永修县,胡春华深入田间地头,实地查看春耕备耕情况。他指出,稳定粮食生产是农业工作第一位的任务,必须以钉钉子精神一季接着一季抓。要切实稳定和扩大粮食播种面积,动员农民抢抓农时开展春播,做好种子、化肥等供应保障,加大伪劣农资打击力度,加强农机调度和服务,全力确保春耕备耕各项工作有序进行。要强化农业科技服务,指导农民适时加强田间管理,提前做好防御农业气象灾害和病虫害的准备。

胡春华还来到湖口县和庐山市,考察鄱阳湖综合治理等工程项目和长江禁捕退捕工作进展情况。他强调,要认真落实长江经济带共抓大保护要求,坚定不移加强长江水生态环境保护,在鄱阳湖等重点流域生态治理上取得更大成效。要从生态系统整体性和长江流域系统性着眼,扎实推进水生态环境保护修复工程,有效改善长江流域生态功能。要加大非法捕鱼打击整治力度,不断巩固退捕禁捕成果,确保长江重点水域“十年禁渔”取得实效。

(信息来源:<http://politics.people.com.cn/n1/2021/0319/c1001-32055968.html>, 2021-04-15, 江西日报)