

文章编号:1007-2284(2021)07-0185-07

# 江苏沿海垦区土壤脱盐过程 受排水条件影响的模拟研究

陈 瑾,罗 纨,贾忠华,张 裕,贺园春

(扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

**摘 要:**江苏沿海垦区具有淡水资源短缺而雨水资源丰富的特点,建设人工排水系统可促进天然降雨对农田土壤盐分的淋洗效果,达到不同的脱盐目标。根据江苏省东台市62年的逐日气象资料,在验证排水模型-DRAINMOD模拟结果的基础上,进一步构建盐分动态模型,分析了不同暗管排水条件下土壤盐分变化过程,建立了研究区盐渍土脱盐效果与排水强度之间的关系。结果表明:DRAINMOD模型较好地预测了地下水位动态变化,所建立的盐分模型对土壤盐分预测值与实测值基本一致;土壤脱盐年限( $N/a$ )与暗管埋深( $D/m$ )及间距( $S/m$ )间的关系可表述为 $N=11.872-7.385D+0.237S$ ;在排水较好(暗管间距为30 m,埋深为1.2 m)的条件下,土壤的脱盐( $<1\text{ g/kg}$ )时间约为10 a;提高排水强度(暗管间距为20 m)后,脱盐时间可降低到8 a;而在排水不畅的情况下(暗管间距 $>100\text{ m}$ ),土壤含盐量经过10年仍在重度( $4\sim6\text{ g/kg}$ )范围内。因此,针对不同的脱盐目标,合理设置暗管排水系统,可加速沿海垦区土壤的脱盐过程,为当地农业生产提供可靠的土地资源。

**关键词:**滨海盐渍土;暗管排水;DRAINMOD;水盐平衡;盐分淋洗;土壤改良

**中图分类号:**TV93;S156.4<sup>+</sup>2

**文献标识码:**A

陈瑾,罗纨,贾忠华,等.江苏沿海垦区土壤脱盐过程受排水条件影响的模拟研究[J].中国农村水利水电,2021(7):185-191.

CHEN J, LUO W, JIA Z H, et al. Simulating the rainfall leaching effect on coastal saline soil facilitated with subsurface drainage systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):185-191.

## Simulating the Rainfall Leaching Effect on Coastal Saline Soil Facilitated with Subsurface Drainage Systems

CHEN Jin, LUO Wan, JIA Zhong-hua, ZHANG Yu, HE Yuan-chun

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** In coastal reclamation area of Jiangsu Province, fresh water resources are scarce and rainfall resources are abundant. The construction of artificial drainage system can promote the leaching effect of natural rainfall on farmland soil salt and achieve different desalting goals. Based on the daily meteorological data of Dongtai in Jiangsu Province for 62 years, a dynamic model of salinity is established based on the simulation result of DRAINMOD. The variation process of salinity in soil under different drain conditions is analyzed, and the relationship between desalination effect and drainage intensity in the study area is established. The results show that the DRAINMOD model predicts the dynamic change of groundwater level well, and the predicted value of soil salinity by the salt model is basically consistent with the measured value. The relationship between soil desalination period ( $N/a$ ), depth ( $D/m$ ) and spacing ( $S/m$ ) of subsurface pipes can be expressed as  $N=11.872-7.385D+0.237S$ . Under well-drained conditions, i.e. drain spacing at 30 m and depth at 1.2 m, the predicted soil desalination (salt content lowered to  $1\text{ g/kg}$ ) time is about 10 years. While drainage intensity is increased by reducing drain spacing to 20 m, the desalination

收稿日期:2020-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51979239);江苏省水利科技项目(2018045,2019040)。

作者简介:陈 瑾(1996-),女,硕士研究生,主要从事农业水土工

程领域相关研究。E-mail:ChenjLearning@163.com。

通讯作者:罗 纨(1967-),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程领域相关研究。E-mail:luowan@yzu.edu.cn。

time is reduced to 8 years. Under poor drained conditions (drain spacing is more than 100 m), the predicted soil salinity remains high even after 10 years of drainage leaching. According to different desalination goals, the subsurface drainage system can be designed reasonably to accelerate the desalting process of soil in coastal reclamation areas and provide reliable land resources for the local agricultural development.

**Key words:** coastal saline soil; subsurface drainage; DRAINMOD; salt and water balance; salt leaching; land reclamation

围垦滩涂曾经是我国沿海地区重要的后备土地资源,对于农、牧、渔业发展具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。由于新围垦滩涂区土壤含盐量高、渗透性差<sup>[3]</sup>,自然脱盐过程十分缓慢<sup>[4]</sup>。江苏省是我国滩涂围垦的主要区域之一,其中盐城市的围垦面积最大,总量占全省总围垦面积的70%<sup>[5]</sup>。虽然目前已经基本停止了围垦工作,但是江苏省现存垦区面积约50万hm<sup>2</sup>,其中未进行改造的面积占比仍然很大,土壤改良任务艰巨。目前,针对沿海滩涂围垦区土壤盐分变化的研究已有不少,但是由于自然条件以及人工措施的差异,得到的结果规律性较差、缺乏系统性地整理。李鹏<sup>[6]</sup>等在江苏如东县东凌垦区的研究显示,在围垦20年和50年后,土壤含盐量都在1 g/kg以下,已处于临界轻度盐化的状态;而在江苏省大丰市围垦时间为9年的研究区内,盐分含量最小仅为0.095 g/kg,最大可达到8.11 g/kg,差别很大<sup>[7,8]</sup>。张建兵等<sup>[9]</sup>在东台市黄海原种场测得土壤平均含盐量差别不大,介于1.27~1.98 g/kg间,但是在土壤剖面上差别很大。造成上述现象的原因主要是围垦后的排水系统建设、运行不规范,再加上土壤特性空间变异性大<sup>[10-12]</sup>,导致土壤脱盐过程存在较大差异。

解决土壤盐渍化问题的基本途径是建设排水系统,通过淋洗作用逐渐将盐分排出<sup>[13]</sup>。虽然沿海垦区淡水资源相对匮乏,利用淡水进行灌溉洗盐存在一定困难,但是江苏沿海地区年均降雨量一般在1 000 mm左右,在排水通畅的条件下,降雨能够形成有效入渗,起到淋洗土壤盐分的作用<sup>[14-16]</sup>。由于沿海垦区土壤多为粉细砂质,结构稳定性差,传统排水明沟不仅存在易坍塌的缺点,而且还有占地面积大、不利于机械化作业的不足。与之相比,暗管排水系统虽然初期投资较大,但能够克服上述缺点,随着我国经济发展和机械化水平的提高,正逐渐成为农田排水的重要工程措施<sup>[17,18]</sup>。合理确定暗管排水系统设计参数,需要了解长期、详细的农田水文变化过程和土壤盐分累积过程<sup>[19]</sup>,现有大田试验研究成果已初步探讨了暗管排盐条件下的水、盐运移规律,但是由于时间尺度的制约、试验环境因素的差异,未能探究暗管排水系统长期作用下土壤盐分的动态变化过程。为此,可利用计算机模型模拟的灵活性,研究不同排水系统布置条件下土壤盐分动态,以便厘清农田排水系统对土壤水、盐的调控作用,明确不同水文气象条件下土壤脱盐过程气及其影响因素。

本文利用在国内外广泛认可的农田排水模型-DRAINMOD<sup>[20-23]</sup>,以江苏省典型滩涂围垦地区东台市弶港镇为例,针对湿润区盐分运动特点,在田间水文过程模拟结果的基础上,构建了土壤盐分淋洗模型,利用实测数据进行了模型验证后,针对研究区典型土壤,模拟了不同暗管排水布置条件下农田排

水及盐分的变化过程,分析了研究区降雨淋洗作用下土壤脱盐效果及影响因素,以为沿海垦区土壤盐渍化治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及数据收集

研究区为江苏省大丰市到如东县的沿海垦区范围。根据江苏省土壤志,垦区土壤多为冲积盐土类,潮盐土亚类,土壤成中度盐渍化状态。为了评价目前围垦区的脱盐情况,本文收集了14项在沿海垦区进行的研究成果,整理得到了土壤含盐量随围垦年份变化的情况<sup>[6-8,11,24-33]</sup>。研究区地处北亚热带暖湿季风气候区,气候温暖湿润,日照充足。

为了验证模型模拟的可靠性,在位于江苏省东台市弶港镇的江苏省水利科学研究院沿海试验基地观测了暗管排水农田地下水位在自然降雨过程影响下的动态变化。同时,测定了站内气象参数,以及土壤的理化特性。在比较模拟结果与实测结果一致性的基础上,利用江苏省东台市长序列气象数据,预测了不同排水条件下的土壤脱盐过程。本文采用的长期气象数据来自中国气象局气象数据中心公布的中国地面气候资料日值数据集(江苏省东台市1953-2014年),气象台站的地理位置为北纬32°33'~32°57',东经120°07'~120°53'。多年平均降水量为1 043.2 mm,最高年降水量为1991年的1 977.4 mm,最低年降水量为1978年的446.3 mm,雨量多集中于6-9月。

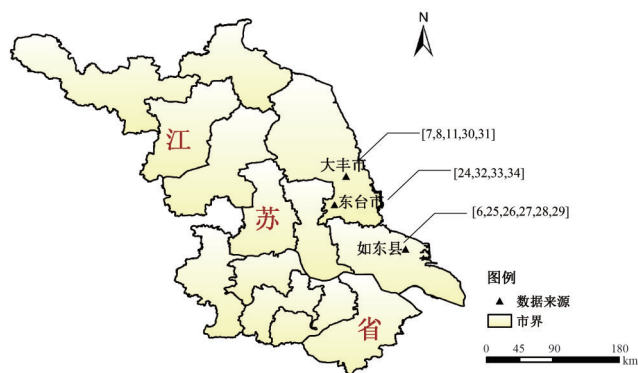


图1 研究区地理位置及盐分数据来源地图<sup>[6-8,11,24-34]</sup>

Fig.1 Map of the study area location and the reported soil salinity data sources<sup>[6-8,11,24-34]</sup>

### 1.2 DRAINMOD模型原理及盐分动态预测模型

DRAINMOD模型是由美国自然资源保护局推荐的田间水文模型<sup>[35]</sup>。它根据输入的气象以及灌排系统设计参数,逐日、逐时计算农田地表、地下水量平衡过程。模型输出的田间水量平衡项包括入渗、蒸发蒸腾、地下排水和地表径流量,以及田间

地下水埋深等日值。在 $\Delta t$ 时段内,农田土壤剖面水量平衡方程<sup>[35]</sup>为:

$$\Delta V = D + ET + D_s - F \tag{1}$$

式中: $\Delta V$ 为土壤水分变化量,cm; $D$ 为侧向排水量,cm; $ET$ 为蒸发蒸腾量,cm; $D_s$ 为深层渗漏量,cm; $F$ 为入渗量,cm。

地表水量平衡方程<sup>[35]</sup>可表示为:

$$P_r + I = F + \Delta S + R \tag{2}$$

式中: $P_r$ 为降雨量,cm; $I$ 为灌溉水量,cm; $F$ 为入渗量,cm; $\Delta S$ 为地表的储水量变化,cm; $R$ 为地表径流量,cm。

除暗管埋深与间距以外,农田地表平整度也是影响农田排水水文过程的重要因素。在DRAINMOD模型中体现为农田局部积水深度 $S_i$ 与总体平均蓄水深度 $S_m$ 两个地表排水参数。当地表排水条件为优、良、差时, $S_m$ 取值分别为3、2、1 cm, $S_i$ 则取值为 $S_m$ 的1/2~1/3。表1列出了DRAINMOD模型主要输入参数:其中部分土壤参数来自于土壤实测数据,部分参考了《江苏土壤》<sup>[36]</sup>中研究区土壤特性,整理得到土壤水分特征曲线、排水特性等土壤参数。

DRAINMOD模型5.0版本中增加了土壤盐分随排水输出的预测模块,但未能得到充分验证;模型后期升级版本中存在的技术问题,致使现有6.1版本中因输入参数不全而无法正确使用。因此,本文在DRAINMOD模型田间水量平衡计算结果的基础上构建了农田土壤剖面盐分动态模型。首先,作物根区土壤的水分平衡可表述为:

$$W = \theta_{sat}(z_{wt}) + \int_{z_{wt}}^{z_{max}} \theta(z) dz \tag{3}$$

式中: $\theta_{sat}$ 为饱和土壤剖面含水率; $z_w$ 、 $z_{max}$ 分别为地下水位(饱和区)和根区深度,cm; $\theta(z)$ 为土壤剖面深度 $z$ 处的含水率; $W$ 为根

区土壤含水量,cm<sup>3</sup>。

如果土壤剖面的盐分初始浓度为 $c$ ,剖面总盐量为:

$$s = Wc \tag{4}$$

在忽略降水中所携带的盐分情况下,只考虑灌溉水中的盐分以及地下水中的盐分输入,在一个较小的时段内( $\Delta t$ ),排水盐分浓度变化很小,则在该时段内剖面盐分变化可以表示为:

$$s' = s - \Delta t \times (Q \times c - Q_{in}c_{in} - Q_{gw}c_{gw}) \tag{5}$$

式中: $s$ 为剖面盐分含量,g; $Q$ 为单位时段内排出土壤的水流量,m<sup>3</sup>/s; $Q_{in}$ 为单位时段内进入土壤的水流量,m<sup>3</sup>/s; $c_{in}$ 为 $\Delta t$ 时段内进入土壤中盐分浓度,g/kg; $Q_{gw}$ 为单位时段内作物利用地下水流量,m<sup>3</sup>/s; $c_{gw}$ 为 $\Delta t$ 时段内作物利用地下水盐分浓度,g/kg。

在时段末,剖面的地下水位变动到 $z'_{wt}$ ,此时的剖面水量为:

$$W' = \theta_{sat}(z_{wt}') + \int_{z_{wt}'}^{z_{max}} \theta(z) dz \tag{6}$$

则在时段末,剖面平均盐分浓度可以表示为:

$$c' = \frac{S'}{W'} \tag{7}$$

式(7)中的 $c'$ 将作为下一个时段的初始浓度。依照上述计算步骤,可逐时段地根据每日排水过程和地下水的变化情况,预测土壤盐分的变化。根据已有研究<sup>[10]</sup>,东台地区新垦土地的土壤含盐量约为11.9 g/kg,本文将该值作为滩涂盐渍土改良的初始盐分浓度。

本文根据研究区长序列日气象数据以及土壤水力特性,利用DRAINMOD模型模拟不同暗管排水系统布置,得到农田排水过程随自然降雨的变化规律,根据输出结果中的逐日水平衡项,利用上述盐分平衡模型,计算了土壤盐分的变化过程。模型主要输入参数列于表1。

表1 DRAINMOD模型主要输入参数  
Tab.1 The main input parameters for DRAINMOD model

参数类别	参数名称	参数值							
排水系统参数	埋深/m	0.6~1.5							
	间距/m	20~200							
	不透水层深度/cm	300							
	排水模数/(cm·d <sup>-1</sup> )	2.5							
	总体平均蓄水深度/cm	1、2、3							
	农田局部积水深度/cm	0.5、1、1.5							
土壤水分特征曲线	吸力/kPa	0	10	20	30	40	50	100	150
	体积含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.347	0.278	0.260	0.243	0.221	0.198	0.157	0.143
土壤排水特性	地下水埋深/cm	0	10	20	30	40	50	100	200
	排空体积/cm	0	0.112	0.293	0.500	0.738	1.014	3.217	9.491
	潜水上涌通量/(cm·h <sup>-1</sup> )	1	0.6	0.24	0.024	0.018	0.009 6	0.000 6	0

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 模型的率定及验证

采用2020年4月20日-7月24日于东台市弶港镇江苏省水利科学研究院沿海试验基地的实际地下水位资料与模型模拟结果进行对比,对DRAINMOD模型进行率定。根据研究区暗管排水系统布置现状,在地表较为平整的条件下暗管埋深设置为0.8 m,暗管间距为8.9 m,利用DRAINMOD模拟该时段内的地下水位逐日变化情况,绘制图2。采用4种统计参数衡量模型模拟的实际效果:均方根误差与标准差比值( $RSR$ );百分比偏差( $PBIAS$ );Nash-Sutcliffe模型效率系数( $NSE$ );相关系数( $r$ )<sup>[37]</sup>。

$$PBIAS = 100 \times \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (8)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_0} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i - \frac{\sum_{i=1}^n O_i \times \sum_{i=1}^n P_i}{n}}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right] \times \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right]}} \quad (11)$$

式中: $O_i$ 为观测值; $P_i$ 为预测值; $\bar{O}$ 是所有观测值的平均值; $n$ 是总数。模拟结果显示 $PBIAS=3.81\%$ ,在 $\pm 25\%$ 之内、 $RSR=0.41 < 0.7$ 、 $NSE=0.83 > 0.65$ 、相关系数为0.92,表明采用这种参数下模型模拟与实测值的误差在规定范围内,模拟效果好。

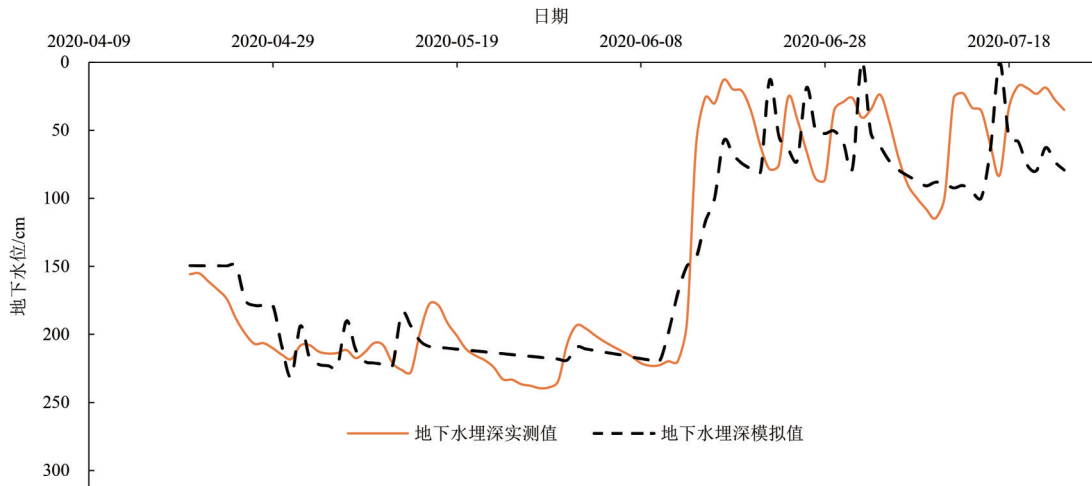


图2 DRAINMOD模型率定的地下水位模拟值与实测值对比图

Fig.2 A comparison between the simulated and measured value of the groundwater level fixed by DRAINMOD

另外,本文根据张华<sup>[34]</sup>等于2013-2014年在该研究区进行的暗管排盐试验的研究结果进行模型验证。该试验中的暗管埋深为0.9 m,间距为17 m。在2013年5月1日-10月31日期间,测得的土壤剖面平均盐分浓度约下降31.28%;而2014年5月1日-10月31日间由于雨量较大(807.8 mm),脱盐率达到

### 2.2 预测不同暗管间距与埋深下土壤的脱盐过程

图4显示模拟值以及文献中报告的沿海垦区土壤含盐量随围垦年份的变化值<sup>[6-8,11,24-33]</sup>。模拟结果依据东台市1953-2014年的逐日气象数据,分别计算了当排水埋深为1.2 m时,土壤盐分在排水良好(间距为20 m)和排水不畅(间距为200 m)情况下

随时间的变化过程。虽然文献中对于排水系统的布置大都没图4中的模拟结果包括暗管埋深为1.2 m且地表平整的条件下,不同暗管间距对土壤含盐量的影响;当排水间距为20 m时,土壤盐分在1~2 a内下降到了初始值的55.5%,5 a内降到初始值的19.3%;而在排水不畅的情况下(间距为200 m),盐分变化过程则十分迟缓,5 a内仅下降到初始值的94.1%。表2列出了依据中国土壤盐渍化分类标准,不同暗管排水条件下土壤脱

47.63%。两年的平均脱盐率为39.45%。图3模拟了研究区在这两个试验期内土壤盐分变化情况,结果显示2013年脱盐率为19.09%,2014年为61.42%,平均脱盐率为40.25%,试验期内平均脱盐率的模拟误差为0.8%,表明模型精度较高,可以用来预测研究区土壤盐分的长期变化。

有详细、定量的说明,但从图4中数据的分布来看,除点2以外,实测盐分数据采集点分布于排水不畅和排水良好地段之间,大部分的监测点(占总数的78%)位于排水良好地带。这主要是由于江苏沿海垦区一般建设有农田排水设施,在降雨淋洗作用下,土壤逐渐脱盐<sup>[24,25]</sup>。

盐所需年数的模拟结果。可见,当暗管排水条件良好时,在天然降雨的淋洗作用下,土壤盐分可在10 a内稳定下降到1 g/kg左右,基本实现脱盐;而在排水设施不完善的情况下,经过10 a后土壤含盐量才能降到重度之下;当排水间距大于150 m时,土壤盐分变化很小。这说明,在天然排水不畅,且无人工排水干预的情况下,土壤中的盐分难以排出,无法实现脱盐目标。因



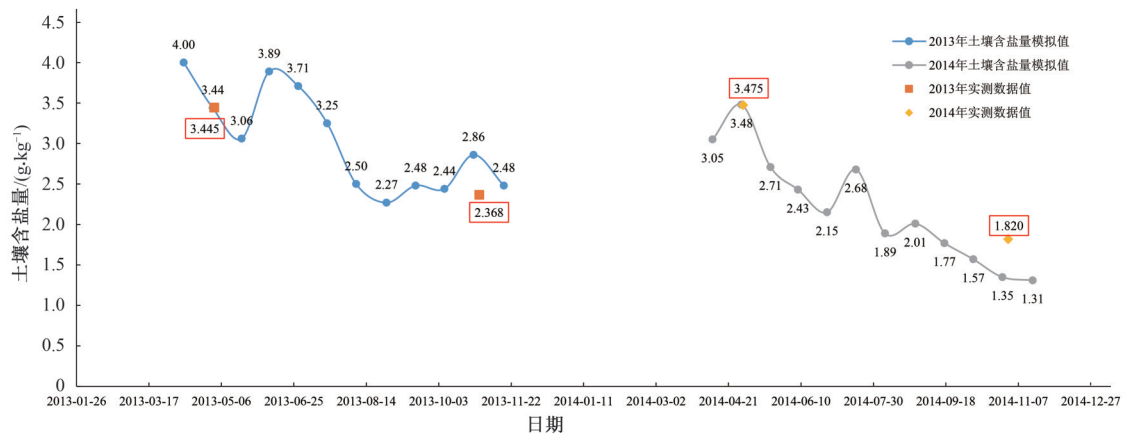


图3 研究区2013-2014年土壤含盐量的实测值与模拟值

Fig.3 Measured and simulated values of soil salinity in the study area in 2013-2014

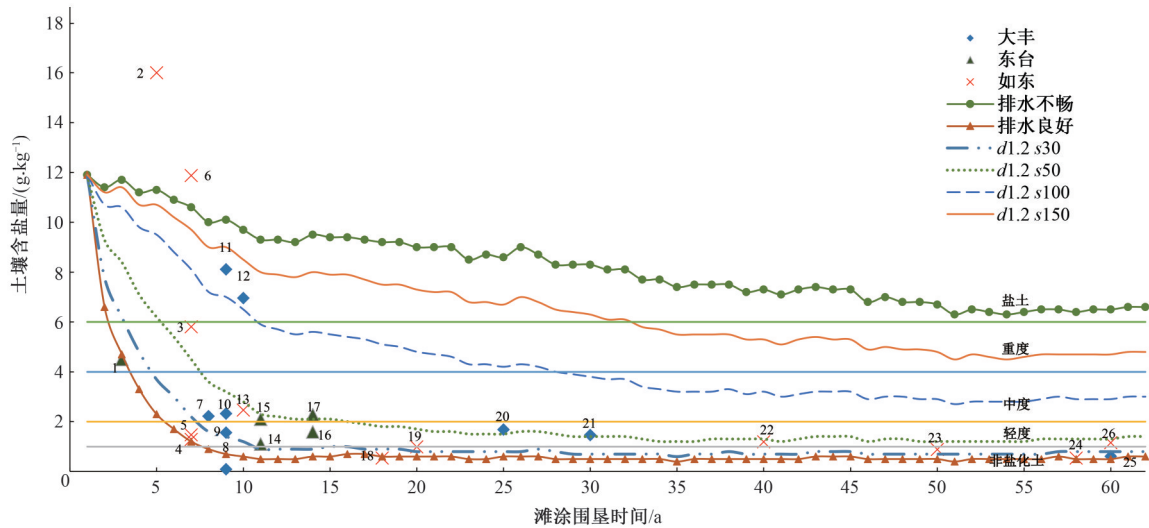


图4 研究区土壤盐分变化预测值与实测值对比( $d$ 为暗管埋深, $s$ 为暗管间距) [6-8,11,24-33]

Fig.4 Predicted and measured soil salinity change with time in the study area ( $d$  for drain depth,  $s$  for drain spacing) [6-8,11,24-33]

此,建设人工排水系统是保证沿海垦区农田土壤免受土壤盐渍化危害的必要措施。

表2 研究区土壤在不同暗管间距条件下至不同盐渍化等级所需的年数计算结果

Tab.2 Calculated number of years required to reach different desalination levels for different drain spacing in the study area

土壤盐渍化等级	暗管埋深与间距					
	d1.2	d1.2	d1.2	d1.2	d1.2	d1.2
	s20	s30	s50	s100	s150	s200
盐土(>6 g/kg)	2	3	5	10	32	
重度(4~6 g/kg)	3	4	7	28		
中度(2~4 g/kg)	5	7	16	62	无限期	无限期
轻度(1~2 g/kg)	7	10	62	无限期		
非盐化土(<1 g/kg)	8	11	无限期			

注: $d$ 为暗管埋设深度,m; $s$ 为暗管间距,m。

图5显示了暗管埋设深度对于土壤脱盐速率的影响。从长期变化来看,当暗管间距为50 m,地表平整度较好的条件下,暗管埋设深度从0.6 m增加到1.5 m,土壤盐分均在前期变化明显,

最后趋于稳定,但最低值为0.9~3 g/kg不等。在图5所示的计算期内,排水农田的土壤盐分均呈明显下降趋势,尤其是在围垦之后的前15 a内,盐分淋洗的效果十分显著,随后土壤盐分在不同气象条件影响下出现波动。这种整体趋势的形成是由于在盐渍化土壤改良初期,土壤的盐分含量较高,排水带出的盐分就相应较多。以达到不同盐分浓度、土壤盐渍化等级为目标调整暗管埋设深度,表3中的结果显示当暗管埋深很小(0.6 m)时,经过长时间淋洗后的最低土壤含盐量为3 g/kg,只能达到中度盐渍化水平;当暗管埋深较大(1.5 m)时,可以在32 a左右达到非盐化土的等级,但研究区所在的沿海地区海拔较低,暗管埋深过大会造成排水出路困难、工程量大、成本较高、不利于生态环境保护等问题。当选取暗管埋深适中(1.2 m)时,土壤盐分含量最终趋于稳定后可达1.4 g/kg,既在当地作物耐盐范围之内,又可以顾及工程成本,是建设排水系统的较好选择。

表3列出了研究区土壤在不同暗管埋设条件下降至不同盐渍化等级所需的年数计算结果。

为了进一步描述土壤降到轻度盐碱化(<1 g/kg)所需时间与排水强度(暗管埋深、间距)之间的关系,建立二元回归分析模型,从而更好地预测数据的发展趋势。本文模拟了研究区在

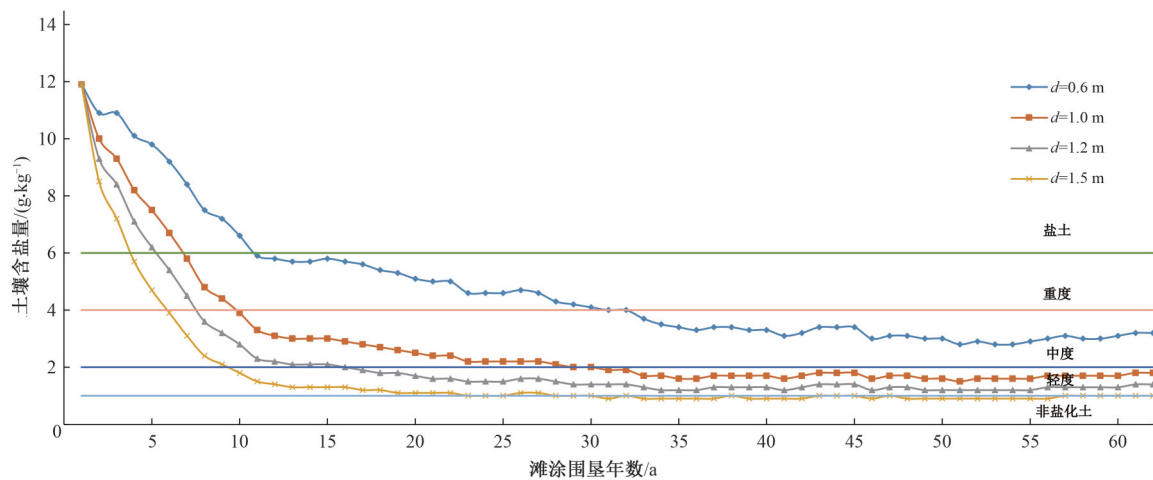


图5 降雨淋洗条件下土壤含盐量随暗管埋深的变化( $d$ 为暗管埋深)

Fig.5 Variation of soil salt content with drainage depth under rainfall leaching ( $d$  for drain depth)

表3 研究区土壤在不同暗管埋深条件下降至不同盐渍化等级所需的年数计算结果

Tab.3 Calculated number of years required to reach different desalinization levels for different drain depth in the study area

土壤盐渍化等级	暗管埋深与间距			
	$d1.5s50$	$d1.2s50$	$d1.0s50$	$d0.6s50$
盐土(>6 g/kg)	3	5	6	10
重度(4~6 g/kg)	5	8	9	30
中度(2~4 g/kg)	9	15	28	
轻度(1~2 g/kg)	23	无限期	无限期	无限期
非盐化(<1 g/kg)	32			

注: $d$ 为暗管埋设深度,m; $s$ 为暗管间距,m。  
地表较为平整时不同暗管埋深和间距条件下的土壤脱盐年份,现拟合 $N=f(D,S)$ 关系函数,得到二元方程为:

$$N=11.872-7.385 D+0.237 S \tag{12}$$

式中: $N$ 为土壤完成脱盐(土壤含盐量降到1 g/kg以下)至少所需要的年份,a; $D$ 为暗管埋深,m; $S$ 为暗管间距,m。相关系数 $r=0.97$ ,表明拟合结果较好。

农田土壤盐分淋洗的有效性取决于地下排水过程,即只有通过暗管排出的水才是淋洗土壤盐分的有效水量,也只有通过地下排水才能够有效淋洗土壤中的盐分。因此,分析不同暗管布置条件下地表排水和地下排水的转化过程可以在很大程度上反映排水系统设计对于盐分淋洗效率的影响。

3 结 论

(1)利用长序列气象数据,运用DRAINMOD水文模型和盐分淋洗模型可以分析不同暗管排水系统布置情况下农田排水洗盐过程,科学布设暗管排水系统可以促进土壤中的盐分快速有效地通过地下水排出,从而改变土壤的盐分分布;暗管布置间距越小、埋深越大,盐分淋洗效果越好;得到土壤脱盐年份和暗管埋深、间距之间的回归方程为 $N=11.872-7.385D+0.237S$ ,因此应重点考虑暗管埋深为1.0~1.5 m,间距为20~50 m的暗管布置组合;

(2)在沿海垦区采用暗管排水措施,合理利用自然降雨即可完成脱盐任务。在排水较好(间距为30 m)的情况下,土壤盐分可以在10 a内降低到1 g/kg,成为非盐化土;对于排水不畅(间距为100 m)的情况,则至少需要10 a才能降到重度之下;

(3)在几乎无排水设施的情况下,土壤内盐分不仅不会减少,反而会随着时间的推移而逐渐累积。对于滨海新垦农田而言,如果在初期就建设完善的排水系统,可以提前实现稳定的农业生产。如需尽快实现脱盐目标,可以适当提高排水强度。沿海垦区利用暗管排水改良盐渍土的同时,还需考虑农田除涝降渍要求<sup>[38]</sup>。由于控盐对降低地下水位的要求较高,满足其设计要求的同时即可满足其他排水要求。 □

参考文献:

[1] WANG Y. The mudflat coast of China [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1983,40(1):160-171.  
[2] 张 冲,杨同军.江苏沿海滩涂资源利用现状及其存在的问题[J].港工技术,2014,51(1):43-45.  
[3] 万 欣,江 浩,王 磊,等.江苏沿海滩涂土壤改良技术研究进展[J].江苏林业科技,2017,44(5):43-47.  
[4] 杨立杰,邵致书,胡海雁.沿海滩涂盐碱地的改良措施[J].科技创新与应用,2014(28):157.  
[5] 张晓祥,严长清,徐 盼,等.近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究[J].地理学报,2013,68(11):1 549-1 558.  
[6] 李 鹏,濮励杰,朱 明,等.江苏沿海不同时期滩涂围垦区土壤剖面盐分特征分析:以江苏省如东县为例[J].资源科学,2013,35(4):764-772.  
[7] 赵秀芳,杨劲松,姚荣江.苏北典型滩涂区土壤盐分动态与水平衡要素之间的关系[J].农业工程学报,2010,26(3):52-57.  
[8] 杨劲松,姚荣江.苏北海涂围垦区土壤质量综合评价研究[J].中国生态农业学报,2009,17(3):410-415.  
[9] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等.田块尺度下的苏北滩涂新垦农田土壤盐分空间变异性分析[J].灌溉排水学报,2013,32(1):39-42.  
[10] 冯 义.沿海滩涂土壤的盐分分布特征[J].江苏农业科学,1989(9):15-17.

- [11] 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等.沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J].农业工程学报,2010,26(11):91-97.
- [12] 李二焕,胡海波,鲁小珍,等.苏北滨海盐土区土壤盐分剖面特征及其理化特性[J].水土保持研究,2016,23(4):116-119,127.
- [13] 王振锋,张凤新,施志石.沿海新垦区盐碱土快速脱盐淡化措施[J].中国农村水利水电,2003(5):5-6.
- [14] 李山,罗纨,贾忠华,等.半湿润灌区控制排水条件下降雨洗盐计算模型研究[J].水利学报,2015,46(2):127-137.
- [15] 方生,陈秀玲.华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响[J].土壤学报,2005(5):28-34.
- [16] LI S, LUO W, JIA Z H, et al. The effect of natural rainfall on salt leaching under water table management [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(6).
- [17] 刘永,王为木,周祥.滨海盐土暗管排水降渍脱盐效果研究[J].土壤,2011,43(6):1 004-1 008.
- [18] 陈阳,张展羽,冯根祥,等.滨海盐碱地暗管排水除盐效果试验研究[J].灌溉排水学报,2014,33(3):38-41.
- [19] 张展羽,张月珍,张洁,等.基于DRAINMOD-S模型的滨海盐碱地农田暗管排水模拟[J].水科学进展,2012,23(6):782-788.
- [20] LUO W, JING W H, JIA Z H, et al. The effect of PET calculations in DRAINMOD on drainage and crop yields predictions in a subhumid vertisol soil district [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009,52(11):3 315-3 319.
- [21] 罗纨,贾忠华,SKAGGS R W,等.利用DRAINMOD模型模拟银南灌区稻田排水过程[J].农业工程学报,2006(9):53-57.
- [22] 李山,罗纨,贾忠华,等.基于DRAINMOD模型估算灌区浅层地下水利用量及盐分累积[J].农业工程学报,2015,31(22):89-97.
- [23] 贾忠华,罗纨,周晓夏,等.干旱与半干旱地区湿地水文及临界条件的模拟研究[J].水利学报,2004(6):27-32.
- [24] 刘广明,杨劲松,姜艳.江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究[J].土壤,2005(2):163-168.
- [25] 解雪峰,濮励杰,朱明,等.基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系[J].地理研究,2017,36(3):495-505.
- [26] 张蛟,崔士友.秸秆和植被覆盖对滩涂围垦区土壤盐分和肥力性质的影响[J].中国土壤与肥料,2018(3):128-135.
- [27] 张蛟,崔士友,冯芝祥,等.气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(2):294-302.
- [28] 崔士友,张蛟,翟彩娇,等.江苏滨海轻中度盐土盐分动态及其与主要气象要素的关系:以江苏如东垦区为例[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(4):100-105.
- [29] 张蛟,崔士友.盐生植物和秸秆覆盖对滩涂极重度盐土养分和降盐效果的影响[J].南方农业学报,2018,49(1):56-61.
- [30] 王彤,封超年,靳瑞萍,等.苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征[J].江苏农业科学,2018,46(19):339-343.
- [31] 张明,高超,尹爱经,等.滩涂区不同围垦年限土壤总盐及盐基离子含量变化规律[J].农业工程学报,2018,34(1):118-126.
- [32] 米迎宾,杨劲松,姚荣江,等.不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J].土壤学报,2016,53(3):612-620.
- [33] 曲长凤,杨劲松,姚荣江,等.不同改良剂对苏北滩涂盐碱土壤改良效果研究[J].灌溉排水学报,2012,31(3):21-25.
- [34] 张华,陈凤,代文君,等.海涂垦区暗管排水条件下水盐运移规律初探[J].江苏水利,2018(3):24-28.
- [35] SKAGGS R W. DRAINMOD reference report: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables [M]. Raleigh: North Carolina State University, 1980.
- [36] 江苏省土壤普查办公室.江苏土壤[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [37] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M W VAN, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

## (上接第184页)

- [9] MIA S, DIJKSTRA F A, SINGH B. Long-term aging of biochar: a molecular understanding with agricultural and environmental implications[J]. Advances in Agronomy, 2017, 141(7):1-51.
- [10] RAHUL D, MEENA R S, PATHAN S I, et al. Carbon and nitrogen cycling in soil [M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020.
- [11] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等.长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):171-176.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] 贺华,达莉芳,尤斌.离子色谱法同时测定土壤中可溶性 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  [J].干旱环境监测,2011,25(3):181-183.
- [14] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1 227-1 234.
- [15] 王静,肖国举,张峰举,等.秸秆还田配施腐熟剂对银北盐碱地改良效果研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):209-215.
- [16] 韩剑宏,李艳伟,张连科,等.生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J].环境工程学报,2017,11(9):5 291-5 297.
- [17] 张体彬,展小云,康跃虎,等.浅层填沙滴灌种植枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J].农业机械学报,2016,47(10):139-149.
- [18] 迟春明,王志春.客土改良对碱土饱和导水率与盐分淋洗的影响[J].农业系统科学与综合研究,2011,27(1):98-101.
- [19] 刘超,魏永霞.秸秆生物炭对寒地黑土区玉米生长发育及耗水规律的影响[J].中国农村水利水电,2015(4):5-8.
- [20] 王凡,屈忠义.生物炭对盐渍化农田土壤的改良效果研究进展[J].北方农业学报,2018,46(5):68-75.