

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.011

暗管排水对江苏沿海滩涂垦区土壤脱盐改良影响的试验研究

吴 为¹, 金 秋²

(1. 江苏汇智工程技术有限公司; 2. 南京水利科学研究院农村水利研究所)

摘要: 针对江苏沿海滩涂垦区土壤含盐量高的现状,为合理利用降雨并采用暗管排水设施实现滩涂土壤脱盐的改良目的,选择典型区域开展了暗管排水试验,通过测试不同暗管埋设间距条件下试验区不同深度(0~80 cm)土壤的含盐量分析了土壤剖面盐分的动态变化规律。结果表明:无暗管的对照区不同深度土壤含盐量呈上升趋势,埋设暗管的区域不同深度土壤含盐量呈总体下降趋势;不同暗管埋设间距条件下不同深度土壤含盐量变化趋势大致相同,但变化幅度有差异,暗管埋设间距越小则土壤脱盐效果越明显;暗管埋设间距相同时土壤脱盐的效果随着土层深度的增加而减弱。

关键词: 沿海滩涂垦区;土壤脱盐;暗管排水;埋设间距;江苏省

中图分类号: S156.4⁺2; S276.7⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2026)05-099-07

Experiment study on effect of underground pipe drainage on soil desalinization improvement in coastal tidal flat reclamation area of Jiangsu Province

Wu Wei¹, Jin Qiu²

(1. Jiangsu Huizhi Engineering Technology Co., Ltd.;
2. Department of Rural Water Management, Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract: There is high salt content in soil in the coastal tidal flat reclamation area of Jiangsu Province. In order to make rational use of rainfall and adopt underground pipe drainage facilities to improve the desalinization of soil in the tidal flat, an underground pipe drainage experiment was carried out in a typical area. By conducting tests under different underground pipe spacings, the analysis of soil's salt content at different depths (0-80 cm) in the experimental area was carried out to study the dynamic change pattern of salinity in the soil profile. The results show that in the control area without underground pipes, the salt content of the soil at different depths shows an upward trend, while in the area with underground pipes, the salt content of the soil at different depths shows a general downward trend. Under different underground pipe spacing, the variation of the soil's salt content at different depths is roughly the same, but the amplitude is different. A smaller underground pipe spacing indicates a more obvious soil desalinization effect; when the underground pipe spacing is the same, the soil desalinization effect will weaken as the depth of the soil layer increases.

Key words: coastal tidal flat reclamation area; soil desalinization; underground pipe drainage; underground pipe spacing; Jiangsu Province

暗管排水脱盐技术遵循“盐随水来、盐随水去”的原理,将具有渗水功能的管道埋设于地下适当深度的土壤中,在自然降水或者人工灌溉的过程中,土壤中可溶于水的盐分随入渗水流向下迁移进入暗管并通过管道排出,从而实现降低土壤盐分、治理盐碱地、有效促进作物生长的目的。

我国对暗管排水开展相关技术研究的区域主要集中在山东、江苏、宁夏、山西、新疆和黑龙江等省(区)^[1-4]。江苏省地处我国长江中下游沿海地区,有大量的盐碱地及围垦滩涂,在利用暗管排水系统调控地下水位以减少降水对农作物的影响以及对盐碱地进行脱盐改良以增加优质耕地和提升耕地农业生产水平等方面取得了大量的研究成果^[5-16]。例如:邵孝侯等^[17]在田间埋设塑料波纹暗管,探讨了塑料暗管对冬小麦土壤水分的调控和节水效能,结果表明,在小麦生育期通过塑料暗管控制灌溉和排水可起到保墒、增温、节水和降渍作用,小麦增产增质效果显著;朱成立等^[18]从经济效益、土壤质量、生态环境 3 个方面构建了滨海盐

基金项目: 江苏省水利科技项目(2024048)

作者简介: 吴为(1988—),男,工程师,主要从事水利工程与水土保持研究。E-mail:693322566@qq.com

通信作者: 金秋(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事农田水利和水土保持研究。E-mail:fengyuwuzujq@163.com

碱地暗管排水改碱效应评价指标体系,综合评价了滨海盐碱地改良综合效应;丁中兵等^[19]在江苏省射阳县盐渍土地区进行棉花种植试验,通过暗管排水系统创造适宜的水分环境,土壤脱盐率达到 61.9%~63.2%,棉花增产 14.9%~28.9%;周明耀等^[20]将暗管排水系统应用于江苏省响水县的滨海沙性盐土地区水稻田,得出土壤水溶解氧含量在有暗管区域比无暗管区域高 1~2 倍的结论;张展羽等^[21]对滩涂洗盐种稻暗管工程技术参数进行了研究,得出不同脱盐标准条件下暗管埋设深度、埋设间距以及管径的确定方法;陈瑾等^[22]根据江苏沿海垦区特点,构建了分析不同暗管排水条件下土壤盐分变化过程的盐分动态模型,建立了盐渍土脱盐效果与排水强度之间的关系;朱海波等^[23]模拟了灌水洗盐和降雨洗盐等方式下暗管排水效果以及排水含盐量变化,结果表明暗管间距越小、埋深越大,初始排水盐度和电导率也越大。

由于盐碱地具有地域特征,不同地区的土壤性质、水文气象因素、地下水埋深等各不相同,已有的很多研究成果具有特定的地域属性。本文选择具有悠久围垦利用历史^[24-25]又具备中国滨海盐碱地典型特征^[26-27]的江苏沿海滩涂作为研究对象,通过测试不同暗管埋设间距条件下试验区不同深度土壤的含盐量来探究土壤剖面盐分的动态变化规律,观察分析土壤的脱盐效果,以期为进一步开展沿海滩涂垦区的土壤脱盐改良工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江苏省东台市弶港镇,属于典型的滨海平原区,是亚热带和暖温带的过渡区,季风显著,四季分明。试验区多年平均降水量 1055.7 mm,多年平均气温 14℃左右,年内降水主要集中在 5—9 月,多年平均蒸发量约 1 200 mm。

试验区地势平坦,地面高程为 3.30~4.77 m(黄海高程),土壤为受海潮顶托及盐分凝聚作用回溯沉降的浅海泥沙,质地为砂壤土(在江苏沿海平原具有一定的代表性)。深度 0~80 cm 的土壤中含盐量(质量比,下同)为 4.4 g/kg,平均干密度为 1.46 g/cm³,孔隙度为 30.1%,pH 值为 7.9。0~20 cm 的耕作层有机质含量(质量比,下同)约为 11.0 g/kg,速效钾含量为 212 mg/kg,有效磷含量为 5.4 mg/kg。

1.2 试验处理设计

试验场地呈长方形,总面积约 6.67 hm²(100 亩)。在土壤一定深度埋设不同间距的暗管,测试暗管排水系统对土壤排水脱盐效果的影响。将试验区分隔为 7 个试区,其中试区 1~6 埋设数量不同的暗管(暗管间距及布置情况见图 1 和表 1),试区 7 为对照区,未埋设暗管。

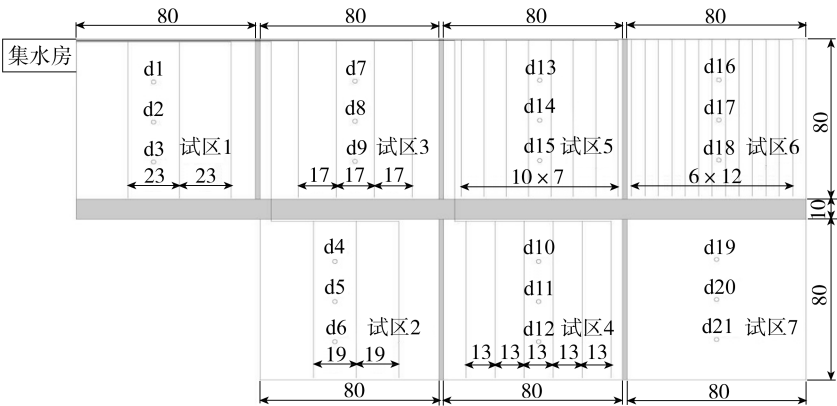


图 1 试验区平面布置示意图(单位:m)

Fig.1 Layout of experimental area (unit: m)

试区 1~6 各布置 3 个盐分监测点(图 1),均布置于各试区中部 2 条相邻暗管的中间位置;试区 7(空白对照试验区)布置的 3 个盐分监测点位于对照区中部。暗管平均埋深约 90 cm,坡降为 1/1 000,暗管起始端埋深为 85 cm,出水口埋深为 95 cm。

采用单壁波纹吸水管吸水、集水管汇流的两级暗管排水管网布置暗管排水区,分隔的 7 个试区均为 80 m×80 m 的标准格田,各试区之间设置田埂,同时还垂直铺设厚 0.25 mm、深 1.5 m 的 PE 膜料,阻断各试区

表 1 试验区暗管布置情况
Table 1 Layout of underground pipes in experimental area

试区 编号	暗管埋设 间距/m	暗管 数/根
1	23	3
2	19	3
3	17	4
4	13	6
5	10	8
6	6	13

之间的土壤水分流通。试区 1~6 的排水汇集于控制设施的小井中,再通过连接多个控制设施的排水管汇入集水房中,然后用水泵排出试验区。

1.3 观测分析方法

1.3.1 暗管排水量及矿化度测定

在试区 1~6 的暗管排水口末端安装电磁流量计测定排水量,每天 8:00 到集水房开启暗管排水阀并记录电磁流量计读数,同时用取样瓶采集 300 mL 水样,封瓶后带回实验室进行含盐量测定,用电导率笔测定水样矿化度。电导率值对应的暗管排出水矿化度计算公式为

$$y = - 0.0902x^2 + 1.772x + 0.0583$$
(1)

式中:y 为暗管排出水矿化度,g/L;x 为电导率值的 1/100,μs/cm。

1.3.2 土样采集方法

试验时间为 2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日,每隔 7 d 取样 1 次,在每个试区的 3 个取样点用土钻取样,每个点取 4 个剖面深度(0~20、>20~40、>40~60、>60~80 cm(为简洁表达,下文统一删掉“>”号))的土样。将土钻顺时针转动并下钻进入相应深度取样,竖直向上提取土样。采用多点混合土样采集法,将每个试区中 3 个取样点 4 个剖面深度的土样混合,保证每个深度的混合土样质量大于 1 kg。

1.3.3 土壤含盐量测定方法

2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日每隔 7 d 测定 1 次土壤含盐量。参照《土壤农化分析》^[28]配置土壤 1:5 浸出液,用电导率笔测定其电导率。根据电导率推算出相应的土壤浸出液盐分含量,再乘以 5 即为土壤盐分含量。

1.3.4 数据处理及分析方法

土壤盐碱性指标参考《土壤农化分析》^[28]的方法进行试验分析,数据整理和图表制作采用 Excel 表格处理,变量之间的相关性采用 SPSS 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 试验区初始盐分分析

在暗管排水脱盐试验之前,对试验区各监测点所在位置不同剖面深度的土壤含盐量进行测定,了解各试区不同深度土壤的本底盐分分布情况,结果见表 2。

按照盐渍土划分标准,土壤含盐量小于 1.27 g/kg 的属于轻度盐渍土,1.27~3.84 g/kg 范围的属于中度盐渍土,>3.84~11.53 g/kg 范围的属于重度盐渍土,大于 11.53 g/kg 的属于超重度盐渍土。对照可知,埋设暗管区域(试区 1~6),0~80 cm 深度土壤均属于中度盐渍土;未埋设暗管区域(试区 7),0~40 cm 深度土壤属于重度盐渍土,40~80 cm 深度土壤属于中度盐渍土。总体而言,该试验区本底土壤含盐量处于较高水平,达不到农作物适宜生长的标准。21 个测点监测的 84 个土壤样品含盐量在 2.00~4.45 g/kg 范围。从水平方向看,由于试验区域面积相对不大且地势较平整,各试区相同深度土层的土壤含盐量变化不大;竖直方向看,同一测点位置处土壤含盐量随着土壤深度的增大而减小。

2.2 土壤含盐量变化规律

2.2.1 0~20 cm 深度土壤含盐量变化

表层土壤的含盐量易受降雨、蒸发的影响,与其他剖面深度的土壤相比,表层土壤的含盐量受水文气象等因素影响而产生的变化比较频繁。暗管排水脱盐试验期间(2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日)0~20 cm 深度

表 2 试验区土壤本底含盐量
Table 2 Background salt content of soil in experimental area

试区	测点	不同深度土壤含盐量/(g/kg)			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm
1	d1	3.52	3.09	2.70	2.05
	d2	3.71	3.35	2.89	2.26
	d3	3.78	3.22	2.66	2.05
2	d4	3.54	3.24	2.86	2.47
	d5	3.59	3.40	2.73	2.49
	d6	3.63	3.14	2.90	2.13
3	d7	3.80	3.39	2.68	2.27
	d8	3.76	3.08	2.83	2.45
	d9	3.78	3.09	2.85	2.00
4	d10	3.56	3.04	2.78	2.16
	d11	3.73	3.05	2.66	2.36
	d12	3.70	3.21	2.88	2.39
5	d13	3.50	3.38	2.61	2.30
	d14	3.62	3.10	2.90	2.44
	d15	3.79	3.14	2.64	2.23
6	d16	3.77	3.12	2.78	2.29
	d17	3.52	3.07	2.90	2.41
	d18	3.65	3.20	2.63	2.12
7	d19	4.29	4.02	3.44	3.07
	d20	4.45	4.08	3.33	2.86
	d21	4.33	3.95	3.43	2.77

土壤含盐量变化在整个土壤含盐量变化中最明显,其土壤含盐量变化曲线如图2所示。

由图2可知,试区1~6的土壤初始含盐量差别不大,试区7的初始含盐量稍高。试验初期(6—8月),试验区降雨频次高且降水量充足,0~20 cm深度土壤中易溶于水的盐分随着降雨淋洗而溶入雨水中,并随雨水下降至埋深90 cm的暗管中,通过暗管排至集水池,经历此过程后土壤中的含盐量逐渐减小,这段时期土壤的含盐量下降明显。8月末至9月,表层土壤含盐量达到试验期间相对低值,此阶段降雨频次低且强度弱,土壤含盐量变化受降雨影响小,转而主要受蒸发作用影响,土壤中的含水量减少,从而在毛细管力作用下导致地下水上升到土壤中,并在蒸发作用下使得土壤含盐量呈小幅度缓慢上升趋势。

暗管排水条件下,试验末期(11月)土壤表层含盐量比初期(6月)显著降低。11月末试区1~6中0~20 cm深度土壤的含盐量分别为1.68、1.55、1.39、1.20、1.11、0.71 g/kg,分别比6月下降了1.99、2.04、2.39、2.46、2.53、2.94 g/kg。无暗管的对照区(试区7)11月末0~20 cm深度土壤的含盐量为5.76 g/kg,比6月上升了1.40 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低深度小于20 cm的土壤含盐量并且随着试验区中暗管埋设间距的减小(暗管数量增加),相应的土壤脱盐效果逐渐增强。

2.2.2 20~40 cm 深度土壤含盐量变化

作物的耕作层深度一般在地下20~40 cm范围,通过暗管排水设施可以降低土壤耕作层的含盐量,从而改善作物的生长环境、增加作物产量。图3为20~40 cm深度土壤含盐量变化曲线。

由图3可知,在埋设暗管情况下,20~40 cm深度土壤含盐量总体呈现下降趋势。试验初期,6月降雨频繁且雨量较大,20~40 cm深度土壤中易溶于水的盐分在降雨淋洗作用下溶于雨水中,并随着雨水下降至地下约90 cm处埋设的暗管中,然后流入集水池,这期间土壤含盐量逐渐下降;7月20~40 cm深度土壤层含盐量呈上升状态,原因在于7月与6月相比降雨频次相对低并且以小雨居多,土壤中的盐分在雨水携带作用下从上层土壤转移到下层但并未从土壤中排出,导致下层土壤积盐且含盐量有所上升。8月降雨充足,20~40 cm深度土壤含盐量在雨水淋溶作用下大幅度下降,于9月中下旬达到试验期间的最低值,此时试

区1~6的20~40 cm深度土壤含盐量分别为1.68、1.55、1.39、1.20、1.11、0.71 g/kg。9月降雨频率及降雨强度下降,蒸发作用的影响开始明显,土壤含盐量下降趋势减弱并逐渐转为上升趋势。

埋设暗管的区域,11月20~40 cm深度土壤含盐量比试验初期(6月)显著降低。11月试区1~6的20~40 cm深度土壤含盐量分别为1.56、1.44、1.35、1.21、0.88、0.53 g/kg,比6月分别下降了1.66、1.82、1.84、1.89、2.33、2.60 g/kg。试区7的20~40 cm深度土壤11月含盐量为5.56 g/kg,比6月上升了1.54 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低20~40 cm深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.2.3 40~60 cm 深度土壤含盐量变化

由图4可知,试验时段埋设不同间距暗管的6个试区40~60 cm深度土壤含盐量变化总体趋势与20~40 cm深度的大概一致,表现为埋设暗管后土壤含盐量最终呈现降低趋势。

埋设暗管的区域,11月40~60 cm深度土壤含盐量比试验初期(6月)显著降低,11月试区1~6的40~

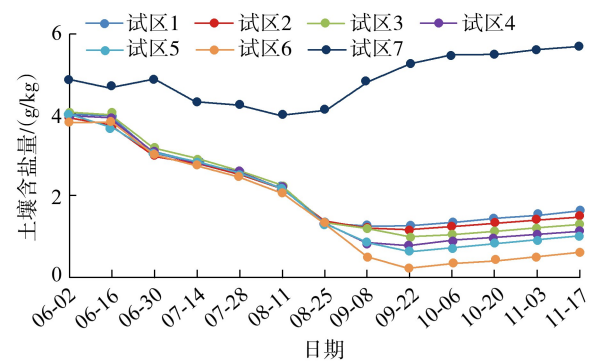


图2 0~20 cm 深度土壤含盐量变化曲线
Fig.2 Variation of soil's salt content at a depth of 0-20 cm

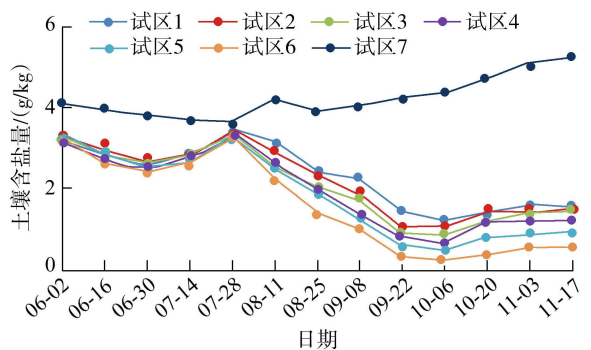


图3 20~40 cm 深度土壤含盐量变化曲线
Fig.3 Variation of soil's salt content at a depth of 20-40 cm

60 cm 深度土壤含盐量分别为 2.01、1.89、1.79、1.64、1.48、1.31 g/kg,比 6 月分别下降了 0.74、0.94、0.98、1.13、1.24、1.46 g/kg。无暗管的对照区(试区 7)40~60 cm 深度土壤含盐量 11 月为 5.28 g/kg,比 6 月上升了 1.88 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低 40~60 cm 深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.2.4 60~80 cm 深度土壤含盐量变化

由图 5 可知,埋设暗管的 6 个试区 60~80 cm 深度土壤含盐量变化与上层土壤的含盐量变化趋势基本一致,表现为埋设暗管后土壤含盐量最终呈现降低趋势。

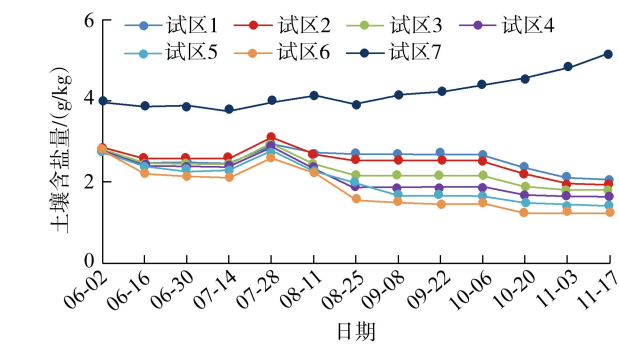


图 4 40~60 cm 深度土壤含盐量变化曲线
Fig. 4 Variation of soil's salt content at a depth of 40-60 cm

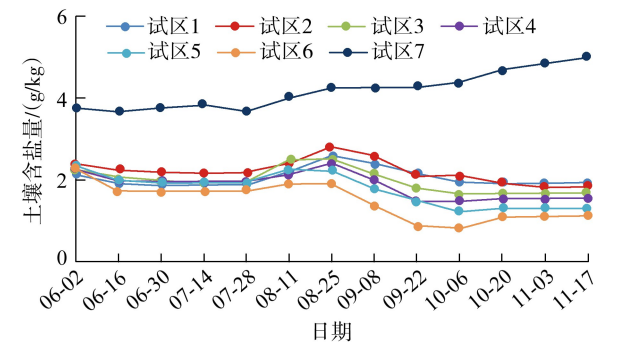


图 5 60~80 cm 深度土壤含盐量变化曲线
Fig. 5 Variation of soil's salt content at a depth of 60-80 cm

埋设暗管的区域,11 月 60~80 cm 深度土壤含盐量比试验初期(6 月)显著降低,11 月试区 1~6 的 60~80 cm 深度土壤含盐量分别为 1.91、1.79、1.67、1.52、1.31、1.13 g/kg,比 6 月分别下降了 0.21、0.57、0.57、0.78、1.01、1.14 g/kg。无暗管的对照区(试区 7)60~80 cm 深度土壤含盐量 11 月为 5.16 g/kg,比 6 月上升了 2.26 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低 60~80 cm 深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.3 土壤纵剖面脱盐规律

图 6 为各试区不同深度土壤的脱盐率,可见在埋设暗管后 0~80 cm 深度的土壤中,不同深度土壤脱盐率变化趋势大致相同,基本上随着暗管埋设间距的减小而有所增大,其中试区 6 的 0~20 cm 深度土壤含盐量下降最明显,脱盐率最高(80.49%);试区 1 的 60~80 cm 深度土壤脱盐率最低(37.97%)。从竖直方向看,整个暗管埋设区内,0~20、20~40、40~60、60~80 cm 深度土壤脱盐率分别为 67.21%、63.60%、40.31%、31.25%,表明在有暗管排水条件下,土壤脱盐率随着土壤深度的增加呈逐渐变小的趋势。无暗管的试区 7 土壤含盐量随着深度增加总体呈现上升趋势,在试验末期(11 月)土壤的含盐量比试验初期(6 月)上升了 37.02%。以上结果表明,埋设暗管有助于降低土壤的含盐量。

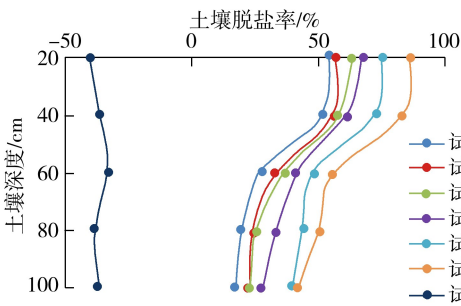


图 6 试验区土壤脱盐率
Fig. 6 Soil desalination rate in experimental area

3 结 论

- a. 有暗管排水区域不同深度土壤含盐量均呈下降趋势,无暗管排水区域呈上升趋势。
- b. 0~80 cm 深度土壤中不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80 cm)土壤含盐量,在暗管埋设间距不同的情况下变化趋势大致相同,但变化幅度有差异,埋设暗管的间距越小土壤含盐量下降幅度越大、脱盐效果越明显。
- c. 0~80 cm 深度土壤中在暗管埋设间距相同的条件下,土壤的脱盐效果随着土层深度的增加而减弱。

参考文献:

[1] 谭攀,王士超,付同刚,等.我国暗管排水技术发展历史、现状与展望[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):633-639. (Tan Pan,Wang Shichao,Fu Tonggang,et al. Development history,present situation,and the prospect of subsurface drainage technology in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2021,29(4):633-639. (in Chinese))

[2] 刘建刚,罗纨,贾忠华.银南灌区控制排水实施效果分析[J].水利水电科技进展,2009,29(1):40-43. (Liu Jiangang,Luo Wan,Jia Zhonghua. Implementation effect analysis of controlled drainage in Yinnan Irrigation District[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1):40-43. (in Chinese))

[3] 高正夏.宁夏青铜峡河西灌区灌排模式对比研究(二)[J].水资源保护,2003,19(1):32-35. (Gao Zhengxia. Comparative analysis of irrigation and drainage modes for west irrigated area of Qingtong Gorge of Ningxia[J]. Water Resources Protection,2003,19(1):32-35. (in Chinese))

[4] 吴明洲,王锦国,陈舟.沿海滩涂淤泥质黏土水盐迁移试验分析[J].水资源保护,2016,32(3):137-142. (Wu Mingzhou,Wang Jinguo,Chen Zhou. Experimental analysis on soil water and salt migration of mucky clay in coastal shoal[J]. Water Resources Protection,2016,32(3):137-142. (in Chinese))

[5] 张长宽,陈欣迪.海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (Zhang Changkuan,Chen Xindi. Advances in development,utilization,and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))

[6] 陈欣迪,陈君,张长宽.盐城市沿海大规模滩涂开发利用评估[J].水利水电科技进展,2016,36(2):53-58. (Chen Xindi,Chen Jun,Zhang Changkuan. Evaluation of large-scale development and utilization of coastal tidal flats in Yancheng City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(2):53-58. (in Chinese))

[7] 许艳,濮励杰,张润森,等.江苏沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势分析[J].地理学报,2017,72(11):2032-2046. (Xu Yan,Pu Lijie,Zhang Runsen,et al. Cropland quality evolution following coastal reclamation at the prograding tidal flats of Jiangsu Province,China[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(11):2032-2046. (in Chinese))

[8] 孙立才,崔士友,张蛟,等.江苏滨海盐土脱盐技术及应用前景[J].农学学报,2021,11(1):27-31. (Sun Licai,Cui Shiyu,Zhang Jiao,et al. Coastal saline soil in Jiangsu:desalting technologies and application prospect[J]. Journal of Agriculture,2021,11(1):27-31. (in Chinese))

[9] 方仁建,沈永明,时海东.基于围垦特征的海滨地区景观格局变化研究:以盐城海岸为例[J].生态学报,2015,35(3):641-651. (Fang Renjian,Shen Yongming,Shi Haidong. The changes of coastal wetland landscape pattern based on the characteristics of reclamation;a case study in coastal wetland of Yancheng,Jiangsu Province,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(3):641-651. (in Chinese))

[10] 陈诚,罗纨,贾忠华,等.江苏沿海滩涂农田高降渍保证率暗管排水系统布局[J].农业工程学报,2017,33(12):122-129. (Chen Cheng,Luo Wan,Jia Zhonghua,et al. Subsurface drainage system layout to meet high assurance rate of waterlogging control in coastal mud-flat farmlands in Jiangsu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(12):122-129. (in Chinese))

[11] 宋翹楚.基于GIS和地统计学的土壤盐分时空变异特征研究[D].南京:河海大学,2019.

[12] 周煜,余夏杨,周廷璋,等.采用高密度电法仪监测围垦区土壤盐分变化[J].水资源保护,2018,34(2):96-101. (Zhou Yu,Yu Xiayang,Zhou Tingzhang,et al. Monitoring on change of soil salinity with high-density resistivity instrument in a reclaimed area[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):96-101. (in Chinese))

[13] 罗锋,常曼,宋晓村,等.江苏沿海滩涂开发利用对策研究[J].水利经济,2016,34(4):1-3. (Luo Feng,Chang Man,Song Xiaocun,et al. Development and strategy of coastal beaches in Jiangsu Province[J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(4):1-3. (in Chinese))

[14] 陈军冰,王乘,郑垂勇,等.沿海滩涂大规模围垦及保护关键技术研究概述[J].水利经济,2012,30(3):1-5. (Chen Junbing,Wang Cheng,Zheng Chuiyong,et al. Key technologies for large-scale reclamation and protection of tidal flats in coastal areas[J]. Journal of Economics of Water Resources,2012,30(3):1-5. (in Chinese))

[15] 钱争,冯绍元,庄旭东,等.基于主成分分析的土壤盐碱化特征研究[J].中国农村水利水电,2022(5):119-124. (Qian Zheng,Feng Shaoyuan,Zhuang Xudong,et al. Research on the soil salinization and alkalization characteristics based on principal component analysis[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(5):119-124. (in Chinese))

[16] 韩冬,姚宇阔,陈超,等.向日葵种植和灌排淋洗改良滨海盐碱地的协同效应研究[J].节水灌溉,2023(7):90-95. (Han Dong,Yao Yutian,Chen Chao,et al. Evaluation on the synergistic effect of sunflower and subsurface drainage on reducing salinity

in coastal saline alkali land[J]. *Water Saving Irrigation*,2023(7):90-95. (in Chinese))

[17] 邵孝侯,郭相平,戴振伟,等. 塑料暗管排灌对麦田土壤水分调控的试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2000,28(2):32-35. (Shao Xiaohou,Guo Xiangping,Dai Zhenwei,et al. Study of effect of drainage and irrigation by plastic subpipes on soil moisture controlling in winter wheat fields[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2000,28(2):32-35. (in Chinese))

[18] 朱成立,陈婕,冯宝平,等. 基于投影寻踪的滨海盐碱地改良综合效应评价[J]. *水利水电科技进展*,2013,33(2):20-25. (Zhu Chengli,Chen Jie,Feng Baoping,et al. Evaluation of the combined effect of coastal saline-alkali soil reclaim based on the theory of projection pursuit[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2013,33(2):20-25. (in Chinese))

[19] 丁中兵,倪同坤. 盐渍土地区暗管排水效应试验研究[J]. *南昌水专学报*,2004,23(1):59-62. (Ding Zhongbing,Ni Tongku. An experimental study of pipe drainage effect in saline soil area[J]. *Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power*,2004,23(1):59-62. (in Chinese))

[20] 周明耀,陈朝如,毛春生,等. 滨海盐土地区稻田暗管排水效果试验研究[J]. *农业工程学报*,2000,16(2):54-57. (Zhou Mingyao,Chen Chaoru,Mao Chunsheng,et al. Experiment and research on seepage effect by underground pipe drainage system of paddy field in saline soil coastland[J]. *Transactions of the CSAE*,2000,16(2):54-57. (in Chinese))

[21] 张展羽,郭相平,汤建熙,等. 滩涂洗盐种稻暗管工程技术参数的研究[J]. *水利学报*,1999,30(4):30-34. (Zhang Zhanyu,Guo Xiangping,Tang Jianxi,et al. Study on technical parameters of buried pipe system for salt leaching in beach area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1999,30(4):30-34. (in Chinese))

[22] 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 Jin,Luo Wan,Jia Zhonghua,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. (in Chinese))

[23] 朱海波,俞双恩,王君. 沿海新垦区灌水和降雨条件下暗管排水洗盐效果试验研究[J]. *中国农村水利水电*,2015(2):99-104. (Zhu Haiibo,Yu Shuangen,Wang Jun. Experimental research on soil desalting by subsurface pipe drainage in new reclamation land of coastal areas under the condition of irrigation and rainfall[J]. *China Rural Water and Hydropower*,2015(2):99-104. (in Chinese))

[24] 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. (Zhang Jiao,Cui Shiyu,Feng Zhixiang,et al. Climatic factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2018,26(2):294-302. (in Chinese))

[25] 王广博,徐翠兰,黄蕊,等. 江苏沿海地区围垦动态与土地利用变化驱动力研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2020,48(2):163-170. (Wang Guangbo,Xu Cuilan,Huang Rui,et al. Research on driving forces of reclamation dynamics and land use change in coastal areas of Jiangsu Province[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2020,48(2):163-170. (in Chinese))

[26] He Bin,Cai Yongli,Ran Wenrui,et al. Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China[J]. *Catena*,2014,118:147-153.

[27] Abliz A,Tiyp T,Ghulam A,et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*,2016,75(3):260.

[28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

(收稿日期:2025-01-29 编辑:熊水斌)