

暗管排水技术治理盐碱地的研究进展

尹广生, 王 祥*, 陈 冲, 李 玮, 彭钰梅, 王 梓, 石 佳, 商建英
(中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100000)

摘 要: 我国盐碱地面积广阔, 次生盐渍化问题突出, 有效改良和综合利用盐碱地的形势仍然严峻。通过分析近 30 年来暗管技术在盐碱地治理方面的相关文献, 较系统地总结了关于外包层、布设参数等方面的应用现状和研究进展; 从实际应用出发, 分析了暗管技术在盐碱地应用和推广中存在的问题, 并对未来研究需要关注的方向提出了建议。

关 键 词: 暗管排水; 盐碱地; 外包滤料; 埋深; 间距; 养分控制; 盐水处理

中图分类号: S278

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022422

尹广生, 王祥, 陈冲, 等. 暗管排水技术治理盐碱地的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.2): 45-51.

YIN Guangsheng, WANG Xiang, CHEN Chong, et al. Review of Subsurface Drains on the Control of Saline-alkali Land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.2): 45-51.

0 引 言

目前全球盐渍化问题不断加剧, 全球盐渍土面积从 2005 年 $9.55 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 增加到约 $1.1 \times 10^{10} \text{ hm}^2$, 其中我国盐碱土面积约有 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 5%^[1]。盐碱土是我国重要的潜在土壤资源, 对于保证 18 亿亩耕地红线、建设高标准农田体系具有重要意义。盐碱土壤形成原因多样。在内陆地区, 由于蒸发量远大于降水量, 潜水带水分强烈蒸发, 携带可溶性盐向上运移, 盐分在土壤表层不断聚集使得土壤盐渍化^[2]。而在滨海地区, 由于人为超量开采地下水导致地下水大幅下降, 海水入侵以及海水入渗使得沿海农田区域地下水埋深浅、矿化度高^[3], 常形成条带状或斑点状的滨海盐碱土。除了气候、地形、水文等自然因素, 人为因素也是盐碱土形成的重要原因。我国耕地灌溉面积广阔, 约有 $6.714 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 49.6%, 但由于灌区设施不配套以及灌排不合理, 土壤次生盐渍化严重^[4]。因此, 合理灌排是防治和改良土壤盐碱化和次生盐渍化的重要措施。

土壤中的水盐运动遵循“盐随水来, 盐随水走”, 暗管排水将带孔隙的管道铺设于地下, 利用降雨或灌溉水将土体中的盐分渗入管道中排出。当地下水埋深较浅时, 地下暗管可以通过控制地下水埋深来防渍防盐。暗管治盐是暗管排水研究的重点^[5], 其对于盐碱地脱盐、地下水位降低、植被恢复、提高作物品质以

及减少土壤侵蚀等具有重要意义^[6-7]。近年来, 我国制订和出台了多部与之相关的标准和规范, 它们从技术的规划、设计、施工等方面对暗管技术的实施进行了规范和说明, 一定程度上降低了暗管排水的应用难度^[8-11]。然而, 目前国内对暗管技术的研究侧重于暗管铺设的优化计算、农田排水及其养分流失, 缺乏对暗管技术应用于盐碱地治理的综合性概述, 因此, 本文分析并归纳了近 30 年来暗管技术在盐碱地治理上关于外包层、布设参数、养分以及盐水处理等方面的研究进展和不足, 以期为该技术在盐碱地治理上提供理论依据。

1 暗管技术

1.1 外包层

暗管中的外包滤料是铺设在排水管周围为了防止泥沙堵塞排水管内部和表面排水孔隙的材料。滤料需要满足透水 and 过滤功能, 并起到支撑作用^[12]。其中透水性要求滤料具有较大孔径, 而过滤性要求具有较小孔径以阻止水流中的砂砾和根系, 因此合理选用外包滤料尤为重要。常用的材料有作物有机残留物、土工布以及颗粒状的砂砾和炉渣等。

有机残留物主要有稻秆、稻壳、麦秆等, 主要由糖类、淀粉、纤维素和木质素等组成, 不同的组分分解速率不同。糖类、淀粉和纤维素等较易被微生物分解, 而纤维素、木质素和单宁等则分解缓慢。采用该类有机材料作为管道外包层不仅需要考虑其过滤性能, 还应考虑其使用寿命, 宜选用含木质素、单宁等含量高的材料。如麦秆属于不耐腐材料, 作为外包层时使用寿命不会超过 4~5 a, 而稻壳在嫌气条件下耐

收稿日期: 2022-07-30

基金项目: 内蒙古自治区科技兴蒙项目 (2021EEDSCXSFQZD011)

作者简介: 尹广生 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: 1783212356@qq.com

通信作者: 王祥 (1983-), 男, 博士生导师, 主要从事耕地保育与土壤退化研究。E-mail: wangxiang@cau.edu.cn

腐较强,使用寿命可长达 10 a^[13]。由于植物残体会随使用年限的增加逐渐腐殖化形成疏松多孔的腐殖质,在形成初期,腐殖质能强烈吸附土壤固体颗粒,在外包层形成一层弱透水层,减少土壤水分的进入,但随着土体养分的消耗、腐殖质固定在土壤颗粒,其过滤效果会变差,导致管内淤土积累。总体来看,该类透水性材料价格低廉、绿色无污染,但由于自身易分解等特点,无法长期使用和大规模工程应用,更适合小范围、短时间、局部轻度盐渍化地区尝试使用。

土工布又称为土工织物。由于生产工艺的不同,其产品类型多种多样。按照是否纺织,常分为织造土工布和非织造土工布。非织造土工布又称为无纺布,也即常所说“土工布”,由于生产效率高、价格便宜等特点已被广泛用作外包材料。土工布内部为三维纤维网结构,具有良好的透水性和过滤性,然而大小不一的孔径和千变万化的形状,也使得不同类型及型号土工布的水力学特性差异显著。土工布的纵向孔隙率对其渗透能力和持水能力的影响相反^[14]。

不同质地土壤,由于不均匀系数 C_u 不同,其渗透变形也不一样。对于非黏性土,当不均匀系数 $C_u \leq 10$ 时,碎砾石由于机械组成差异较大,其渗透变形类型为管涌,在一定水流下土壤颗粒从小到大依次被冲走,最后形成管状水流通道。而砂土由于机械组成较均一,渗透变形类型主要为流土,在渗流作用下交界面处部分土壤的所有颗粒会同时被冲走^[15]。当砂粒的等效粒径小于土工布的等效孔径时,大量沙粒会穿过纤维网淤堵在管表面,当砂砾粒径大于等效孔径时,砂粒会在纤维网表面形成的薄饼能有效保土,但也降低了透水性^[16]。黏性土中由于黏粒量多,其可自由移动颗粒的数量多,在渗流力作用下自由颗粒进入土工布孔隙内部进而发生淤堵^[17]。因此,对于土工织物的选择应根据当地土壤状况具体选择。针对黄河三角洲粉粒含量过高的特点,刘文龙等^[18]选取了 2 种热熔纺黏丝无纺土工布,通过理论计算和渗透试验观测,发现符合 IDP 60 标准的土工布能较好满足当地土壤 (C_u 为 3.8) 的外包滤料透水、反滤与防淤堵要求。荣臻等^[19]选取已经投入实际应用的 7 种土工布分析其对宁夏银北灌区不均匀系数 C_u 为 6.95 的粉壤土的流量衰减过程,得出热熔黏丝无纺布的保土和防淤堵效果较强。胡玲玲等^[20]通过室内渗透试验探究了单一土工布和土工布与不同粒径砂滤料组合外包料的渗透性、保土性及防淤堵性差异,发现 68 g/m^2 土工布加上粒径为 1 mm 的砂滤料能有效防治河套灌区下游地区外包滤料的淤堵。

此外,滤料中颗粒状砂砾和炉渣也有应用。人工筛选的砾石作为外包滤料具有一定普适性,能满足大

部分排水要求,但是砾石的运输、筛选成本相对较高,目前无法应用在非开沟的铺管机上。炉渣的应用则较为谨慎。炉渣来源多样,如炼钢、焚烧垃圾和火电厂等,不同来源和工艺的炉渣化学成分不同且复杂,其中垃圾焚烧炉渣主要由熔渣、陶瓷、砖块、石头、玻璃、铁和有色金属以及极少量可溶物组成^[21]。其中可溶性盐排放、重金属析出等潜在隐患是限制其利用的主要因素。

除了材料的选择,滤层结构也影响着暗管排盐效果。基于进入排水管约 70% 的水来自管道下方径向流的假设,有研究者提出了一种适用于稳定土壤或有较高水力梯度土壤的内外双层波纹管过滤结构^[20-21]。而在非饱和区域,入渗水流在重力作用下以径直向下运动为主而较少做水平运动。为了增加暗管的汇流面积,李显激等^[22]提出在暗管下方铺设一定宽度的防渗材料来提高其排盐效率。秦文豹等^[23]则提出在暗管上半部设置倒锥形滤层,利用细砂垫层与黏壤土之间的导水率差异来减缓土壤水向暗管底部的绕流速率,使暗管上部产生局部饱和区,从而迫使土壤水分进入暗管。

1.2 埋深和间距

暗管技术改良盐碱地的关键在于埋深和间距参数的确定,其影响着土壤脱盐效率^[24]、土壤盐分的空间异质性^[25]以及养分量。目前,盐碱地暗管排水技术参数的埋深和间距确定方法主要有田间试验、公式计算和水文模拟。

1.2.1 田间试验

在田间布设暗管,通过观测实际效果可以直观判断布置优劣,符合当地实际,但耗费大量人力物力。根据表 1 可知,新疆的暗管埋深范围约为 0.6~2.2 m,间距 5~100 m;江苏暗管埋深范围约为 1.2~1.5 m,间距为 15~20 m。由于田间数据来自各地,而不同地区的土壤质地、地下水埋深、气候、作物和经济发展状况等不同,因此各地经验值差异性较大。除了田间试验结果,各标准也给出了参考数值。《暗管改良盐碱地技术规程》根据我国 2013 年以前各地试验结果,给出了当暗管埋深为 0.8~1.0 m 范围时不同质地土壤下的暗管铺设间距(表 2);《灌溉与排水工程设计标准》给出了无试验资料时,吸水管埋深和间距的关系(表 3);《农田排水技术工程规范》则提供了吸水管间距经验参考值(表 4)。对比表 1—表 4 可知,各地田间试验的实际质地类型和暗管埋深、间距的关系与各标准给出的参考值并完全不相同,这是因为:①不同地区对暗管的要求不同,滨海地区暗管需要同时除渍排盐,地下水位高地区以控制地下水为主,而非饱和区域则以灌溉排盐为主;②作物类型和品种不同,不同作物根系长度和耐盐性差异较大,对埋深和

脱盐率要求不同；③土壤类型和机械组成间的差异。

表 1 近 30 年国内部分地区田间试验暗管治理盐碱地主要参数表

Table 1 The main parameters of the control of saline-alkali land in the field experiments in some areas of China in the past 30 years

区域	地点	质地 ^a	吸水管				地下水埋深	外包滤料	灌溉	主要作物
			埋深	间距	管径	管材				
内陆地区	河套灌区乌拉特前旗西山咀农场 ^[26]	粉壤土	1.1	10	8	PVC	1.0~1.8	无纺布	轮灌	稷子
	内蒙古鄂尔多斯达拉特旗王爱召镇东兴村 ^[27]	砂壤土	1.2~1.5	18	-	-	0.4~0.7	-	黄河水漫灌	-
	吉林大安市安广镇 ^[28]	中壤、重壤	0.8	5	11	PE	-	砾石+	漫灌	水稻
	新疆昌吉州玛纳斯县包家店镇 ^[29]	粉壤土、粉土	0.6	5	11	PVC	>4	双层玻璃纤维布	膜下滴灌	棉花
	新疆维吾尔自治区沙湾安集海灌区 ^[30]	砂壤土、壤土	0.6	15	9	PVC	>4	无纺布+砾石	滴灌	油菜
	新疆生产建设兵团第一师十六团五连 ^[31]	砂壤土	0.8	10	11	PVC	0.6~1.0	无纺布+砾石	膜下滴灌	棉花
	新疆伊犁州察布查尔县堆依齐乡伊车村 ^[32]	-	1.5~2	60~70	10	PVC	2~3	粗化纤材料+砾石	灌水	水稻
	新疆石河子生产建设兵团 147 团 ^[33]	中、重壤土	1.8~2.2	70~100	11	PVC	春 1.2~2, 夏秋 2.5~3.5	—	膜下滴灌	棉花
滨海地区	河北沧州市南大港农场 ^[34]	黏土	1.2	30	11	PVC	0.3~1.0	砾石	—	棉花
	江苏南京市江宁区 ^[35]	黏土	0.8	-	5	PVC	1.8	无纺布	微咸水	玉米
	江苏响水县大有镇 ^[36]	砂壤	1.1	15	-	-	-	纤维丝+稻壳	-	水稻
	山东胶东半岛西北部莱州市 ^[37]	砂壤土	1.2	14	6	PVC	2~4	土工布	-	玉米
	天津滨海新区 ^[38]	粉质黏壤土	1.2	3~8	6.3~11	PVC	-	-	-	园林植物

注 a 缺乏统一标准，这是由于不同文献中参考的土壤质地标准不同。

表 2 暗管间距与土壤质地的关系^[11]

Table 2 The relationship of buried depth and spacing of subsurface pipes

土质	埋深/m	间距/m
粘土		8~14
壤土	0.8~1.0	14~20
砂土		20~24

表 3 吸水管埋深和间距^[8]

Table 3 Buried depth and spacing of subsurface pipes

吸水管埋深/m	吸水管间距/m		
	黏土、重壤土	中壤土	轻壤土、沙壤土
0.8~1.3	10~20	20~30	30~50
1.3~1.5	20~30	30~50	50~70
1.5~1.8	20~50	50~70	70~100
1.8~2.3	50~70	70~100	100~150

表 4 吸水管间距经验参考值^[9]

Table 4 Experience reference value of subsurface pipe spacing

暗管埋深/m	黏土、重壤土/m	中壤土/m	轻壤土、砂壤土/m
0.6~1.0	10~20	10~20	20~40
1.0~1.5	10~20	20~40	40~70
1.5~2.0	20~40	40~70	70~110
2.0~2.5	a	70~110	110~160

注 a 表示黏土、重壤土地区的临界深度较小，吸水管埋深一般不需很大，故未列出相应的间距值；而临界深度较大的轻、砂壤土地区，则需要较大的吸水管埋深和间距值。

1.2.2 公式计算

暗管埋设深度取决于当地土壤类型、地下水位和作物等实际因素。当地下水埋深较浅时，暗管的埋深计算式为^[38]：

$$h_d = h + \Delta H + h_0 = h + \frac{L}{2} \tan \theta + h_0, \quad (1)$$

$$h_d = (r + d_{\max}) + \Delta H + h_0, \quad (2)$$

式中： h_d 为吸水管埋设深度（m）； h 为地下水临界深度（m）； ΔH 为两吸水管中间地下水位与吸水管中水位之差，即剩余水头（m）； h_0 为暗管中水深，一般取吸水管管径的 1/2（m）； L 为暗管间距（m）。

地下水临界深度又称为临界水位，是防止土壤次生盐渍化的最大地下水埋深。该区域由毛管上升区（ $d_{\max}$ ）和植物根系活动层（ r ）组成，故地下水临界深度等于最大毛管上升高度加上作物最大根长。不同质地土壤的毛管作用不同，因此地下水临界深度主要取决于土壤质地和作物品种。然而该临界深度是从某时刻静止的毛管水上升极限出发，忽略了毛管水的流速、水流量等因素，因此有研究者^[39]提出使用“允许深度”来代替临界深度，即“在不危害植物的前提下允许土壤耕作层出现短暂的积盐，但是这个积盐必须在盐分运动周期之内为随之而来的脱盐过程所消

除”。使用允许深度计算出的埋深更符合实际控盐过程(式2),但如何量化毛管的上升高度以及快速判断积盐量和盐分运动周期过程仍有待解决。

间距计算式主要有稳定流计算和非稳定流计算。稳定流,即水在渗流场内的运动不随时间改变,进水量与出水量相等,如盐碱地冲洗排盐。在稳定渗流下,由 Dacey 定律可推导出单位面积排水强度与排水地段的作用水头成正比。目前应用较广的有 Hooghoudt 公式^[40]和阿维里扬诺夫-瞿兴业公式。其中 Hooghoudt 公式基于 Dupuit 假设,认为地下水运动为一元流动,忽略渗流速度的垂直分量。阿维里扬诺夫-瞿兴业公式则适用于有入渗补给且不透水层位于无限深处的情形。当水力要素随时间而变化,则为非稳定流,是自然界中普遍存在的情况,如强降雨后地下水的升降局部滴灌等。对于非稳定渗流下暗管间距的计算,有学者^[41]根据排水过程中土壤剖面的盐量平衡关系,通过地下水位降落全过程中的蒸排比计算暗管间距,根据水量平衡原理考虑地下水蒸发影响的地下水位下降关系式,采用泰勒公式展开和优化拟合得到暗管间距^[42],用“模糊档次”分级方法近似处理隔水层深度,推导组合排水管间距的非稳定流简化通式^[43],用系统工程中数学规划的方法来确定排水的最优埋深和间距^[44]。此外,对于地表积水覆盖,地下水位形状为水平曲线时, Kirkham 等^[45]推导了上覆不透水层的饱和均质土壤地下排水流量理论公式。各公式都有其假设条件和适应情况,相同条件下,不同方法得出的结果差异较大。不管是稳定流还是非稳定流,其计算都烦琐、工作量大,且各方法中的水力参数常需要大量水文资料。将农田排水理论及公式编写成计算机程序,通过程序进行最优选择和计算是未来解决不同场景暗管铺设的有效途径^[46]。

1.2.3 水文模拟

随着计算机的快速发展,综合性的水文模型得到快速发展和应用,如 DRAIN-MOD、HYDRUS-2D/3D、SWAT 等。这些模型可以通过气象、土壤、作物等水文数据来模拟农田地表及内部的土壤水分运动过程。其中 DRAIN-MOD 已经由初始的湿润地区水资源管理扩展到 DRAINMOD-N 和 DRAIN-MOD-S 模型。DRAINMOD-S 以水量平衡为基础,通过输入相应参数可以模拟土壤盐分分布、排水含盐量以及盐分对作物的影响^[47]。DRAINMOD-S 对我国滨海盐碱地农田暗管排水模拟效果较好^[48]。对于 HYDRUS-2D,刘义等^[49]分别提出用虚拟土层和实际开孔面积来代替 HYDRUS-2D 在暗管排水中的暗管原有渗透边界,以及用阻力层、实际入渗面和等效半径来代替 HYDRUS-2D 中地下管道的标准渗流边界,并在土

壤盐分、水分以及排水排盐方面获得了较高的模拟精度^[50]。SWAP 则是流域尺度上长期预测的水文模型,主要用于模拟农田尺度上的土壤-水-大气-植物环境中的水分运移、溶质运移、热量传输、植物蒸腾以及作物生长等过程^[51]。庄旭东等^[52]利用 SWAP 模型对不同暗管埋深和间距下的土壤剖面处水分通量和盐分通量进行模拟,分析发现在综合考虑不同暗管布局的排水排盐效果以及对产量的影响时,当地暗管埋深取 2.0 m,暗管间距取 45 m 较为适宜。

确定暗管埋深和间距的方法众多,使用不同方法得出的参数往往差异较大。如对于山东小开河灌区,李庆国等在考虑工程建设、材料及不同埋深及间距组合的成本差异下,以单位面积投资最小为目标建立系统优化模型,通过理论计算后得出暗管铺设最优方案为埋深 2.4 m,间距 137 m^[53];而李晓华^[54]在考虑暗管排水、排盐效果及土壤脱盐效果下,通过田间试验得出在暗管埋深 2.5 m 情况下最适宜的间距为 45 m。因此,针对某地区埋深和间距的确定不应局限于某一种方法,而应综合考虑。在考虑当地作物和经济发展状况下,结合经验数据和理论公式得出大致范围,在典型区根据数值模拟获取区域性的水盐运动规律,而田间实验可以得知实际排盐效果。

2 暗管技术在治理盐碱地中出现的问题

2.1 养分控制

暗管技术排水排盐的同时也会使土壤中有有机质和速效养分(氮、磷等)流失,使得原本贫瘠的盐碱土更加“贫瘦”,不利于作物生长发育。暗管与其他培肥改良技术的结合,在降低土壤盐分的同时,还能增加土壤养分,缩短从改良到作物正常生长的时间。李婧男等在滨海盐渍区通过暗管配合农业改良剂将治盐与改土相结合,有效降低了土壤 pH 值和含盐量,增加了土壤孔隙度、饱和导水率以及土壤养分^[55]。对于透水性弱的苏打盐碱土,田玉福等^[28]通过暗管改碱、化学改土和有机肥土相结合,提高了苏打盐碱土的渗透性,降低了土壤 pH 值、全盐量,显著改善了土壤理化性质。张凯凯^[56]通过研究暗管排水和稻草还田对设施连作土壤改良及切花菊品质的影响,发现暗管排水条件下进行稻草还田能显著降低表层土壤盐分,增加土壤中的有机质和速效养分,提高切花菊的品质。不过,目前对暗管排盐与增肥的配套研究仍然不足,仍有待研究人员进一步探究。

暗管排水也控制着盐分降低和养分流失状况。通过自然降雨或灌溉的淋洗,暗管排水能有效控制地下水埋深,减少涝害发生,降低土壤含盐量,弱化土壤盐分的空间异质性,促进土壤盐分分布从异质性向均

质性转变^[57]。通过控制暗管排水的时间和水量，可以有效减少土壤水分和养分的流失，增加土壤含水量^[58]。Gunn 等^[59]通过比较自由排水和不同控制高度排水，发现控制排水不仅降低了地下排水率，而且还降低了硝酸盐和磷的损失。

2.2 盐水处理

妥善处理排出的含盐水是暗管技术在盐碱地需要关注的重点之一。国内布设暗管时往往对排出的含盐水处理模糊，部分地区甚至将排出的含盐水直接排入沟渠河道，使得盐分从一个区域流向另一个区域，造成盐分区域循环流动。有研究提出将排出的盐水通过收集池收集，将其作为灌溉水反复利用^[60]，但长期使用矿化度 $>3\text{ g/L}$ 的微咸水进行灌溉，会使得土壤积盐加重^[61]。此外，不同微咸水矿化度的使用也与暗管的埋深和间距有关^[62]。

滴灌由于用水量少，将其与暗管技术结合的微咸水灌排技术可以有效减少盐分累积。刘玉国等^[33]针对新疆膜下滴灌棉田，分析了暗管降盐技术对轻度和中度盐渍化农田土壤盐分变化规律及棉花产量的影响，发现轻度和中度盐渍化农田土壤盐分剖面特征均由表聚型向脱盐型变化，与滴灌配套的浅层暗管排水降盐技术可有效治理盐碱土壤，提高棉花产量。温越等^[63]在 0.6 m 暗管埋深下进行 2 次滴灌淋洗，发现土壤盐分排出量大，土壤脱盐率高，对油葵的株高和叶面积指数增长具有显著的促进作用。此外，由于滴灌条件下的土壤多为非饱和土壤，非饱和土壤中的基质吸力以及暗管中的空气会对进入暗管的水产生阻力。而大孔隙流是一种非平衡重力流，具有较高的流速和明显的漏斗吸力，能够对附近的基质流产生吸力效应，从而产生朝向大孔隙的吸力流，因此有研究者提出将优先流与暗管技术结合，通过人造大孔隙来促进暗管排水排盐^[64]。

2.3 技术安装

暗管技术在盐碱地的应用，既需要理论研究的支撑，也依赖于高效的机械安装设备。目前，国际上已经生产出相对完善的暗管结合滤料的自动化铺管机和铺设流程，配套机械设施下能实现一体化、自动化安装^[12,65-66]。而我国开沟设施的自主开发研究也取得了一定成果，研发出一系列开沟机。针对开沟挖渠，自主研发了一系列的旋转圆盘开沟机^[67]。此外，通过结合 GPS 导航等技术，提高了开沟铺管机的智能化水平^[68]。然而，国内在开沟机等方面的研发离国际先进水平仍有一定差距。首先是对各种土壤开沟的适应能力差。盐碱土干时易板结，湿时泥泞淤积，对开沟机的行走和功率提出了更高要求。其次是功能单一、体型较大，无法满足实际生产和开发中多样化的需求，

导致研发出来的产品在市场上生存空间狭小，企业和研究院缺乏进一步研发的资金和动力。最后是，费用高昂、能耗大，阻碍了产品的推广和发展。目前，国内大部分盐碱地区暗管的安装仍然采用挖掘机挖沟和人工安装的方法，这一定程度上阻碍了暗管技术的应用和发展。

3 展望

综上，暗管技术是改良和利用盐碱地的重要途径之一，我国众多学者对暗管应用于盐碱地进行了大量研究，并取得了一定进展。但对于暗管技术在盐碱土的研究和应用仍存在许多问题有待解决。在目前研究的基础上，暗管排盐技术治理盐碱地方面需要重点关注。

1) 继续深化暗管下的水盐运移规律和基础理论研究，在已有模型的应用中进一步优化和完善各项模型参数，建立水盐运移的综合数据库。将农田排水排盐理论编译为程序，开发出适合我国的水文模拟软件。

2) 多措并举，注重暗管治盐下提升土壤肥力的深入研究，在治理土地盐渍化的同时提升土壤肥力，以达到综合改良、高效治理的目的。

3) 暗管安装设备与配套的机械设施协同发展，配套设施是否到位直接影响暗管技术的应用。因此，需要扩大已有研究范围，注重配套设施的研发，提高整体工作效率。

参考文献：

- [1] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- [2] HAJ-AMOR Z, BOURI S. Subsurface drainage system performance, soil salinization risk, and shallow groundwater dynamic under irrigation practice in an arid land[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(1): 467-477.
- [3] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15, 9.
- [4] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 88-96.
- [5] 丁新军, 田军仓, 朱和. 国内外暗管排水研究知识图谱可视化分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 91-99, 109.
- [6] 张洁, 常婷婷, 邵孝侯. 暗管排水对大棚土壤次生盐渍化改良及番茄产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 81-86.
- [7] MONTAGNE D, CORNU S, LE FORESTIER L, et al. Soil drainage as an active agent of recent soil evolution: A review[J]. Pedosphere, 2009, 19(1): 1-13.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 灌溉与排水工程设计标准: GB 50288—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

- [9] 中华人民共和国水利部. 农田排水工程设计规范(SL/T4—2020)[M]. 北京: 中国水利水电, 2020.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. 暗管改良盐碱地技术规程 第1部分: 土壤调查(TD/T 1043.1—2013)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [11] 中华人民共和国国土资源部. 暗管改良盐碱地技术规程 第2部分: 规划设计与施工(TD/T 1043.2—2013)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [12] RITZEMA H P, NIJLAND H J, CROON F W. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1/2): 60-71.
- [13] 梁干华, 陈祖森. 农田暗管管道有机外包层对排水的影响及其耐腐蚀性能[J]. *农田水利与小水电*, 1990(5): 12-15.
- [14] 谢中意, 李明思, 韩寒, 等. 排水暗管滤层土工布的水力性能与其孔隙结构关系的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(12): 87-96.
- [15] 齐俊修, 赵晓菊, 刘艳, 等. 不均匀系数 $C_u \leq 5$ 的无黏性土的渗透变形类型统计分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2 554-2 562.
- [16] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(1): 89-93.
- [17] 庞小朝, 朱江颖, 周小文. 土工织物淤堵试验装置及方法改进研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(3): 68-73.
- [18] 刘文龙, 罗纨, 贾忠华, 等. 黄河三角洲暗管排水土工布外包滤料的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 109-116.
- [19] 荣臻, 王少丽, 郝瑞霞, 等. 宁夏银北灌区排水暗管土工布外包料透水与防淤堵性能[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 68-75.
- [20] 胡玲玲, 杨树青, 梁志航, 等. 河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(4): 141-148.
- [21] 何晶晶, 宋立群, 章骅, 等. 垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(4): 395-398.
- [22] 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(5): 616-625.
- [23] 秦文豹, 李明思, 李玉芳, 等. 滴灌条件下暗管滤层结构对排水、排盐效果的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7): 80-85.
- [24] 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.
- [25] 张金龙, 闻铁, 王鹏山, 等. 暗管排水控制区土壤盐分淋洗研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 242-246.
- [26] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 602-609.
- [27] 李争争, 屈忠义, 杨威, 等. 暗管排水对鄂尔多斯地区重度盐碱地盐分迁移规律的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7): 122-129.
- [28] 田玉福, 窦森, 张玉广, 等. 暗管不同埋管间距对苏打草甸碱土的改良效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 145-153.
- [29] 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(4): 537-544.
- [30] 衡通, 王振华, 李文昊, 等. 滴灌条件下排水暗管埋深及管径对土壤盐分的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 111-121.
- [31] 杨玉辉, 周新国, 李东伟, 等. 暗管排水对新疆高水位膜下滴灌棉田盐分淋洗效果的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11): 137-144.
- [32] 孟凤轩, 迪力夏提, 罗新潮, 等. 新垦盐渍化农田暗管排水技术研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 106-109.
- [33] 刘玉国, 杨海昌, 王开勇, 等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 84-90.
- [34] 于淑会, 刘金铜, 刘慧涛, 等. 暗管控制排水技术在近滨海盐碱地治理中的应用研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(3): 42-46.
- [35] 万长宇, 张展羽, 冯根祥, 等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤盐运移特征的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 37-41.
- [36] 周明耀, 陈朝如, 毛春生, 等. 滨海盐土地区暗管排水系统布置模式的研究[J]. *江苏农业研究*, 2000, 21(3): 34-38.
- [37] 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.
- [38] 张金龙, 张清, 王振宇. 天津滨海盐碱土灌排改良工程技术参数估算方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 52-55.
- [39] 张万钧, 龙怀玉, 郭育文, 等. 天津滨海园林绿化中盐土治理的理论及工艺[J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5): 40-44.
- [40] SHOKRI A, BARDSLEY W E. Enhancement of the hooghoudt drain-spacing equation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2015, 141(6): 04 014 070.
- [41] 戴同霞, 翟兴业, 张友义. 考虑蒸发影响和脱盐要求的田间排水沟(管)间距计算[J]. *水利学报*, 1982, 13(11): 67.
- [42] 马英杰, 沈冰, 虎胆 吐马尔拜. 蒸发影响下农田排水沟(管)间距的计算[J]. *水利学报*, 2006, 37(10): 1 264-1 269.
- [43] 王少丽, 翟兴业. 盐渍兼治的动态控制排水新理念与排水沟(管)间距计算方法探讨[J]. *水利学报*, 2008, 39(11): 1 204-1 210.
- [44] 邵孝侯, 俞双恩, 金斌斌. 麦田塑料暗管排水的埋深和间距优化模式探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2000(12): 12-13.
- [45] KIRKHAM. Flow of ponded water into drain tubes in soil overlying an impervious layer[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1949, 30(3): 369-385.
- [46] 李会贞, 李法虎, 周新国, 等. 农田暗管-明沟组合排水系统布设参数计算与设计软件编程[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 101-108.
- [47] SKAGGS R W, YOUSSEF M A, CHESCHEIR G M. DRAINMOD: model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1 509-1 522.
- [48] 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.
- [49] 刘义, 曾文治, 敖畅, 等. 基于改进的 HYDRUS-2D 模型暗管排水过程模拟[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 221-228.
- [50] LIU Y, AO C, ZENG W, et al. Simulating water and salt transport in subsurface pipe drainage systems with HYDRUS-2D[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125823.
- [51] JIANG J, FENG S Y, MA J, et al. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model[J]. *Field Crops*

- Research, 2016, 196: 85-97.
- [52] 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(8): 93-101.
- [53] 李庆国, 刘建强. 黄河三角洲盐碱地工程治理暗管布设系统优化[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2): 121-123.
- [54] 李晓华. 黄河三角洲农田暗管排盐效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [55] 李婧男, 孙向阳, 张贺, 等. 暗管排盐条件下园林废弃物与膨润土对滨海盐土的改良效果研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 562-574.
- [56] 张凯凯. 暗管排水和稻草还田对设施连作土壤改良及切花菊品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [57] SHARMA D P, SINGH K, RAO K V G K. Subsurface drainage for rehabilitation of waterlogged saline lands: Example of a soil in semiarid climate[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(4): 373-386.
- [58] WESSTRÖM I, MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 229-240.
- [59] GUNN K M, FAUSEY N R, SHANG Y, et al. Subsurface drainage volume reduction with drainage water management: Case studies in Ohio, USA[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 131-142.
- [60] 石佳, 田军仓, 朱磊. 暗管排水对油葵地土壤脱盐及水分生产效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 46-50.
- [61] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44-51.
- [62] 冯根祥, 张展羽, 方国华, 等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤盐分动态及夏玉米生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 880-885.
- [63] 温越, 王振华, 陈林, 等. 暗管埋深对滴灌油葵农田水盐运移及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 183-189.
- [64] CHEN W J, LI M S, NIE J J, et al. Experimental study on macropore flow effects in unsaturated soil on subsurface drainage and soil desalination[J]. Irrigation and Drainage, 2021, 70(4): 832-844.
- [65] ALAVI S A, NASERI A A, BAZAZ A, et al. Performance evaluation of the Hydroluis drainpipe-envelope system in a saline-sodic soil[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106 486.
- [66] CHIENG S. Subsurface drainage practices: guidelines for the implementation, operation, and maintenance of subsurface pipe drainage systems[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2006, 20(1): 151-153.
- [67] 董建军, 武广伟, 付卫强. 我国农田开沟机研究进展及展望[J]. 农机化研究, 2014, 36(2): 237-240.
- [68] 王丽丽, 胡小安, 伟利国, 等. 大型开沟铺管机自动控制系统的研制[J]. 机电工程, 2012, 29(12): 1 448-1 452, 1 460.

Review of Subsurface Drains on the Control of Saline-alkali Land

YIN Guangsheng, WANG Xiang*, CHEN Chong, LI Wei, PENG Yumei, WANG Zi, SHI Jia, SHANG Jianying

(Faculty of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100000, China)

Abstract: The saline-alkali land area in China is vast and the secondary salinization problem is prominent. The situation of effective control and improvement of saline-alkali land is still severe. Based on the analysis of the literature on the application of subsurface drainage technology in saline-alkali soil treatment in the past 30 years, the application status and research progress of filter layer and layout parameters of subsurface drainage were systematically summarized. Based on the practical application, the problems was analyzed in the application and promotion of subsurface drainage technology. And put forward some suggestions for future research.

Key words: subsurface drainage; saline and alkaline land; filter layer; buried depth; spacing; nutrient control; brine treatment

责任编辑：白芳芳