

改进暗管排水结构型式对排水性能的影响

陶 园^{1,2} 王少丽¹ 许 迪¹ 瞿兴业¹

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 提出一种占用耕地少、排水流量较常规暗排大且环境友好的改进暗排。基于室内土柱试验,分析改进暗排在地表积水、土体饱和条件下的排水除涝性能及其机理,提出地表积水土体饱和入渗条件下改进暗排排水流量的理论计算公式。结果表明,改进暗排可以有效提高暗管排水能力,试验条件下,反滤体宽度为2~6 cm的改进暗排在自由出流条件下的排水流量为常规暗排排水流量的2~3倍;积水层深度相同时,改进暗排排水性能随反滤体宽度的增加而增大,但增幅逐渐减小;土体介质和反滤体的渗透系数差别越大,改进暗排的排水作用越明显。理论方法计算结果与试验结果相吻合,证明提出的理论计算公式是合理可行的。

关键词: 改进暗排; 常规暗排; 排水流量; 反滤体

中图分类号: S276 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0113-06

Effect of Structure-type on Improved Subsurface Drainage Performance

Tao Yuan^{1,2} Wang Shaoli¹ Xu Di¹ Qu Xingye¹

(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In China, there are large challenges for agricultural drainage system because of frequent flood and shortage of cultivated land, and new requirements are put forward to agricultural drainage system. Improved subsurface drainage was proposed which had characteristics of less cultivated land occupied, more environment friendly and larger drainage discharges than those of conventional subsurface drainage. Based on soil column experiment, the performance and mechanism of the improved subsurface drainage were analyzed under conditions of soil saturation and stable ponding surface water, which considered different soil textures, outflow conditions and ponding depths. Furthermore, a theoretical formula of improved subsurface drainage discharge was given. The results indicated that the drainage capability of the improved subsurface drainage was increased significantly. The drainage discharge equaled to 2~3 times of that of conventional subsurface drainage when filter width was varied from 2 cm to 6 cm under the experimental conditions. Drainage capability was increased with the increase of filter width, but the increased value was decreased gradually. In addition, the performance of improved subsurface drainage was going to be more obvious with the increase of gap between hydraulic conductivities of soil and filter. Compared the theoretical values with experimental ones, it was shown that the proposed theoretical formula was reasonable and feasible. The research results can provide technological support for the application of improved subsurface drainage. Meanwhile, the research will be beneficial to enrich theory and technology of agriculture drainage, which has important practical significance to ensure food safety and promote sustainable development of irrigated area.

Key words: improved subsurface drainage; conventional subsurface drainage; drainage discharge; filter

收稿日期: 2015-08-04 修回日期: 2015-10-01

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B00)、国家自然科学基金项目(51279212)和中国水利水电科学研究院博士学位论文创新研究项目

作者简介: 陶园(1988—),女,博士生,主要从事农业水土资源与环境研究,E-mail: taoyuanss.good@163.com

通信作者: 王少丽(1963—),女,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事农业水土环境及灌排理论研究,E-mail: shaoliw@iwhr.com

引言

我国是世界上涝灾频繁且严重的国家之一,涝灾往往对农业生产造成重大损失。据统计,2006—2012 年我国因涝灾导致的农作物受灾面积平均约为 1 100 万 hm^2 ,2012 年由涝灾导致的粮食减产量达到 240.5 亿 $\text{kg}^{[1]}$ 。近年来,受全球气候变化的影响,水灾的突发性、异常性和不可预见性日益突出^[2],加之人类活动的干扰加剧,对农田排水除涝能力提出了新的要求^[3]。明沟是我国当前使用最广泛的一种排水方式,排水流量大是其最主要优势,但也存在明显的劣势,如占用耕地多、易坍塌、难养护等。暗管排水(以下称常规暗排)作为随后发展起来的排水方式,其优势在于不占用耕地、降渍效果明显^[4-5]以及可以有效减少农田污染物排放^[6],符合我国现阶段耕地保护由单一的数量管理向数量、质量和生态三位一体管理转变的原则。但是常规暗排的最大局限性在于排水流量小,难以迅速排除田间积水,在除涝中起到的作用远不如明沟显著。针对我国涝灾频发、耕地资源紧缺等问题,参照和借鉴明沟排水流量大的特点,提出一种改进的暗管排水技术(以下简称改进暗排),使其具有排水流量较常规暗排大、占用耕地面积少、环境友好的优点。可以预期,利用改进暗排与明沟相结合形成的组合排水将会比常规的明暗组合排水^[7-8]产生更大的效益。

本文通过改进暗排排水性能的室内试验和理论研究,揭示地表积水土体饱和条件下反滤体宽度及出流方式对暗排排水流量的影响及其规律,提出积水入渗条件下改进暗排排水流量的计算公式,为丰富和发展我国农田排水理论和技术提供科学依据。

1 改进暗排简介

1.1 改进暗排结构

改进暗排由暗管和反滤体 2 部分组成(图 1)。以合理级配的砂砾石(或其他强透水材料)作为反滤体,在传统暗管开挖基础上,采用分层或混合的方

法由暗管底部向上铺设至田面以下 30 ~ 40 cm(耕层以下),并在其上方回填原状土作为耕作层。该结构充分利用了反滤体材料渗透性能大于田间土壤渗透性能的特点,提高暗排的排水能力。其与控制排水技术相结合,对于旱作物,可在雨季加速田面积水消退以及地下水位下降,减轻旱作物受淹和受渍历时;对于水稻田,可以实现控灌控排及雨季涝水的有效排除。该暗排技术可大大增加土壤的透气性能,已有研究表明,通气性好的土壤可为作物根系生长提供良好条件,利于有机质分解和速效养分的供应以及粮食产量的提高^[9-10]。

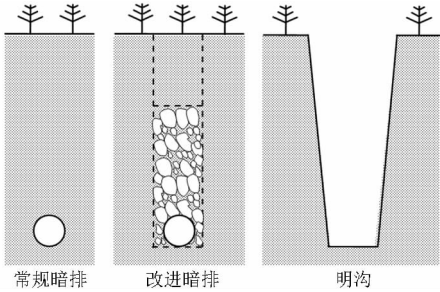


图 1 不同排水方式对比

Fig. 1 Comparison of different drainage types

1.2 饱和和积水条件下的水流特征

传统观念认为暗管排水的主要作用在于控制地下水位,在有自由水面的无压运动条件下,Hooghoudt 假定水流在暗管附近为辐射流,而距离暗管大于 $W/\sqrt{2}$ 时水流符合 Dupuit - Forchheimer 假设,水流呈水平向流动^[11],如图 2a 所示(L 为暗管间距, W 为不透水层深度)。而对于地下水埋深较浅的农田,遭遇强降雨时,极易导致地下水位升至地表,继而产生积水出现淤涝,形成地表积水的有压运动条件^[12-13],如图 2b、2c 所示。该条件下,水流运动在地表处以垂向入渗为主,进入土壤一定距离后,逐渐由垂直方向变为朝向暗管的斜向运动,局部水平运动属于二维达西渗流。改进暗排通过设置反滤体增加了强透水边界的长度,一定程度上减小了水流的渗径长度,增强水流汇入的速度,同时一部分水通过强透水边界后将在反滤体内部形成垂向水流进

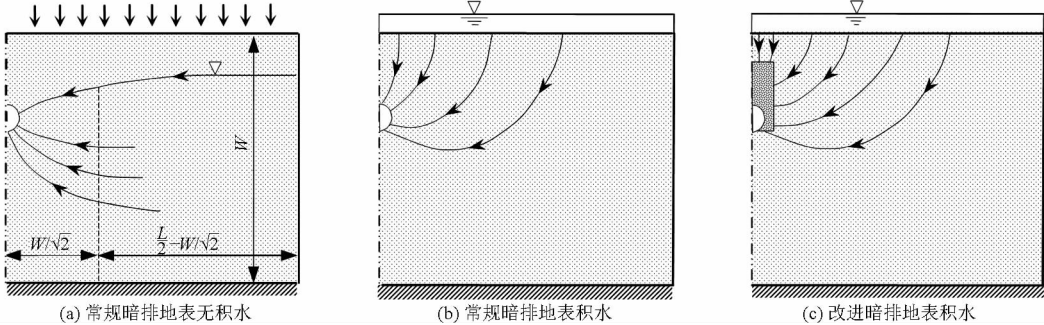


图 2 地下水流运动示意图

Fig. 2 Sketch of water flow underground

入暗管。

2 材料与方法

2.1 试验装置

以暗管埋深 90 cm、反滤体高度 60 cm、回填土层厚 30 cm、暗管外径 7.5 cm 的田间工程为参照,近似按 1:6 的比例进行缩小,设计非完整暗管排水的室内模拟试验装置如图 3 所示,试验装置中暗管埋深为 15 cm,反滤体高度为 10 cm,回填土厚为 5 cm,暗管直径约为 1.2 cm。考虑到反滤体要以暗管为中轴平均铺设于暗管两侧,为铺设方便,试验中的反滤体宽度拟定为偶数,分别取 0、2、4、6 cm。装置主体为内径 18.8 cm、外径 20 cm、高 100 cm 的有机玻璃筒。筒内分 3 层填装:最下部填装厚度为 10 cm 的强透水材料(直径 5~6 mm 的玻璃珠),目的是为出流提供良好条件,其顶部放置尼龙丝网作为支撑网以防止上部土体介质流失;中部为厚度 60 cm 的不更换土体介质,距离玻璃筒底部 70 cm 处放置排水暗管,暗管由光滑铜管制作而成,开孔率为 1.5%,暗管外侧包裹透水性强的滤网布,起滤水和防淤堵作用,用以模拟田间实际工程中使用外包土工织物的波纹塑料管工作条件;暗管上方的 15 cm 土层为可更换的土体介质,常规暗排渗流试验时,上部填装厚度 15 cm 的土体介质,而改进暗排渗流试验时,以暗管为对称轴填装高度 10 cm、宽度分别为 2、4、6 cm 的反滤体材料(直径 2~6 mm 的混合玻璃珠),并在反滤体周边及上部充填 5 cm 厚度土体介质。试验土体介质选择 40~70 目(粗砂土)和 80~120 目(细砂土)的 2 种石英砂。

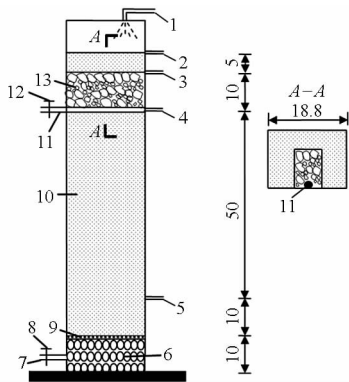


图3 试验装置结构图(单位:cm)

Fig. 3 Sketch of test equipment (unit: cm)

1. 进水口 2~5. 测压管 6. 强透水材料 7. 出水口 8. 止水夹
9. 支撑网 10. 土体介质 11. 排水暗管 12. 止水夹 13. 反滤体

2.2 试验装置有效性验证

CHRISTIANE^[14]和 KABOOSI 等^[15]曾采用长方体砂槽开展暗管排水试验,为使试验装置简化、便于

加工并保持良好的止水性,本试验采用圆柱体装置,并通过 Hydrus3D 对长方体和圆柱体装置条件下的常规暗排排水流量进行对比以验证装置设计的合理性。

圆柱体模型尺寸与试验装置相同,即横断面为直径 18.8 cm 的圆形,长方体模型横断面长度为 18.8 cm,宽度(暗管间距)依据渗流面积相等折算为 14.77 cm。采用 VAN Genuchten 模型^[16]描述土壤水力特征曲线,土壤参数选择 CARSEL 等^[17]给出的砂壤土参数,并设定积水深度为 7 cm,得到圆柱体装置中暗管的流量为 34 800 cm³/d,长方体装置中的流量为 35 600 cm³/d,二者相差 2% 左右,可以说明选择圆柱体装置进行暗管排水的试验是有效的,且利用渗流面积等效的方法计算暗管间距也是合理的。

2.3 试验设计与观测方法

参照饱和土壤、地表积水条件下的常规暗排排水流量计算公式,选择土体介质、反滤体宽度、出流方式和积水层深度作为研究因素。试验方案包括粗砂土和细砂土 2 种土体介质、自由和淹没 2 种出流方式、反滤体宽度分别为 0、2、4、6 cm 的 4 种暗排结构型式以及 3、5、7 cm 3 种积水层深度共 48 种组合形式。方案采用 $Aa-i$ 的形式表示,其中, $A=C$ 、 F 分别表示粗砂和细砂土介质; $a=f$ 、 s 分别表示自由和淹没出流(淹没深度 h_s 为 4.5 cm,即 0.3D,D 为暗管埋深); $i=0$ 、2、4、6 表示反滤体宽度分别为 0(常规暗排)、2、4、6 cm(改进暗排)。考虑到细砂土介质更接近田间实际情况,因此本文以分析细砂土介质为主,以粗砂土介质作为现象进行对比。

试验开展前,将土体介质分层填装,并控制一定的容重;采用平水箱连接玻璃筒底部出水口由下向上缓慢注水的方式(更利于气体充分排出)进行土体介质饱和,出现积水后改用上部供水的方式形成试验的积水条件。砂土介质的渗透性较强,暗管排水流量较大,因此采用水龙头供水,虹吸管调节溢流量的方法来维持稳定的积水条件。每次更换反滤体后均在稳定积水条件下开启排水暗管一段时间,以消除水流对土体介质和反滤体渗透系数的影响;然后关闭排水暗管,打开玻璃筒底部出水口,通过一维达西渗流试验测算筒中装填的土体介质和反滤体的渗透系数。最后关闭底部出水口,并开启暗管出水口,记录给定时间内暗管排出的水量。每组试验重复测量 3 次,流量的误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,取 3 次测算结果的平均值作为该试验条件下的排水流量。

2.4 渗透系数计算

给定积水层深度条件下,排水流量达到稳定时,

读取各测压管水头,测算玻璃筒下部出水口的排水流量,根据达西定律公式^[10]得到不同装填介质的渗透系数如表 1 所示。可以看出,相同土体介质的渗透系数相对稳定,粗砂土介质平均约为 0.025 79 cm/s,细砂土介质平均约为 0.001 37 cm/s,且 2 种土介质中反滤体的渗透系数也相对稳定。粗砂土介质中,反滤体与土体介质渗透系数之比 k_0/k 的平均值约为 10,而细砂土介质中的 k_0/k 平均约为 78。细砂土介质的渗透系数变幅较小,粗砂渗透系数变化略大,但用于分析论证排水流量变化的规律性是可行的。

表 1 不同装填介质的渗透系数

Tab.1 Hydraulic conductivity of different fillers				
土体介质	结构型式	土体渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	反滤体渗透系数 $k_0/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	k_0/k
粗砂土	C-0	0.029 29		
	C-2	0.025 05	0.280 6	11.20
	C-4	0.024 05	0.291 7	12.13
	C-6	0.024 75	0.231 3	9.35
细砂土	F-0	0.001 39		
	F-2	0.001 28	0.102 4	80.00
	F-4	0.001 44	0.106 3	73.82
	F-6	0.001 35	0.098 0	72.59

2.5 改进暗排排水流量计算公式

有限厚度含水层中,恒定运动、地表积水入渗条件下,常规暗排单长排水流量的理论公式^[18]表示为

$$q_d = \frac{k(H - H_d)}{\Phi_d} \tag{1}$$

其中
$$\Phi_d = \frac{1}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\pi \left(h_d - \frac{d}{2} \right)}{\operatorname{th} \frac{\pi h_d}{b}} \tag{2}$$

式中 q_d ——单长暗管排水流量, m^2/d
 k ——暗排地段含水层的平均渗透系数, m/d
 H ——田面积水层表面高程

H_d ——暗管周边水头高程
 h_d ——暗管中心低于地面的深度,即埋深, m
 Φ_d ——暗排地段的渗流阻抗系数,由地段的各项几何参数确定
 d ——暗管直径, m b ——暗管间距, m

仿照式(2)的形式,采用进水周边长度相等排水渗流量相同的假定,将改进暗排的矩形反滤体等效为直径 d_0 的圆形排水通道,且圆形排水通道底部与反滤体底部重合。一般情况下,反滤体介质的渗透性能与周边土体相比大得多,改进暗排的作用水头可近似采用 $H - H_d$ 表示,得到改进暗排工程单长暗管排水流量的理论公式为

$$q_{d_0} = \frac{k(H - H_d)}{\Phi_{d_0}} \tag{3}$$

其中

$$\Phi_{d_0} = \frac{1}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\pi \left(h_{d_0} - \frac{d_0}{2} \right)}{\operatorname{th} \frac{\pi h_{d_0}}{b}}$$
$$d_0 = \frac{2}{\pi} (b_0 + h_0) \tag{4}$$

式中 b_0 ——反滤体的宽度, m
 h_0 ——反滤体的高度, m
 h_{d_0} ——圆形排水通道中心的埋深, m
 Φ_{d_0} ——改进暗排地段的渗流阻抗系数

对于常规暗排,取 $d_0 = d$,此时改进暗排的排水流量计算公式与经典理论公式一致。

3 结果与分析

3.1 反滤体结构型式对暗排排水流量的影响

表 2 给出了不同组合方案下的暗排排水流量。由表 2 可知,在粗砂土和细砂土介质中,积水层深度相同时,暗排的排水流量均随反滤体宽度的增加而增大,但增幅逐渐减小。

表 2 不同组合试验方案下的排水流量

Tab.2 Drainage discharge of different combination experiments										cm^3/s
土体介质	积水层深度/ cm	反滤体宽度/cm								
		自由出流 f				淹没出流 s				
		0	2	4	6	0	2	4	6	
细砂土 F	7	0.505	1.152	1.337	1.527	0.401	0.879	1.029	1.203	
	5	0.453	1.045	1.241	1.436	0.353	0.821	0.930	1.064	
	3	0.406	0.939	1.104	1.269	0.303	0.722	0.812	0.960	
粗砂土 C	7	10.556	15.378	16.356	17.544	6.988	10.801	11.026	11.489	
	5	9.182	13.671	14.541	15.385	5.590	9.742	9.960	10.379	
	3	7.850	12.257	13.036	14.115	4.582	8.547	8.909	9.393	

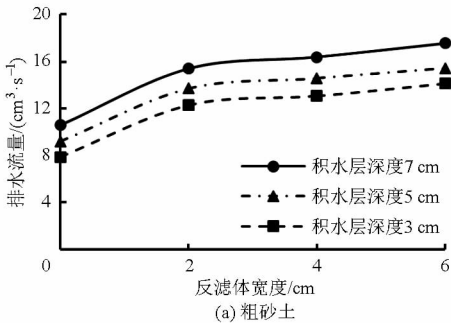
以 7 cm 积水层深度为例,粗砂土介质中,反滤体宽度为 2、4、6 cm 的改进暗排比常规暗排自由出

流排水流量分别增大了 45.7%、54.9%、66.2%;而细砂土质中,相比于常规暗排,改进暗排 Ff-2、Ff-

4、Ff - 6 排水流量分别增大 128.1%、164.8%、202.4%。2 种介质中改进暗排排水流量增加的效果都很明显,且细砂土介质中改进暗排排水流量增加百分比大于粗砂土介质。由此可见,土体介质的渗透性与反滤体的渗透性差别越大,增设反滤体对增大暗管排水流量的作用越显著。

3.2 积水层深度对暗排排水流量的影响

不同积水层深度、自由出流条件下,反滤体宽度



与暗排排水流量的关系曲线大致平行,即常规暗排和改进暗排的排水流量均与作用水头呈正比关系,且相同反滤体宽度的暗排排水流量增加值基本相同,见图 4。积水层深度为 7、5、3 cm 条件下,反滤体宽度为 2 cm 的改进暗排较常规暗排排水流量分别增大 128.1%、130.7%、131.3%;反滤体宽度为 6 cm 的改进暗排较常规暗排排水流量分别增大 202.4%、217.0%、212.6%。

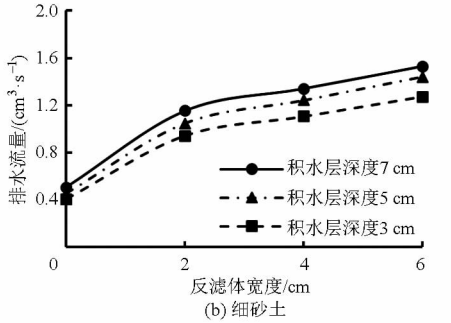


图 4 自由出流条件下反滤体宽度对暗排排水流量的影响

Fig. 4 Effect of filter widths on subsurface drainage discharge under free outflow condition

3.3 出流方式对暗排排水流量的影响

试验结果显示,无论在粗砂土介质还是细砂土介质中,当暗管淹没深度为 0.3 倍暗管埋深(0.3D)时,暗管排水的排水流量较自由出流均减少超过 20%。因此,实际工程运行中应尽量避免淹没出流的情况发生。

淹没出流条件下暗排排水流量的变化规律与自由出流条件一致:积水层深度相同时,随反滤体宽度增加,暗排的排水流量逐渐增大,但增幅逐渐减小。其他条件相同时,不同反滤体宽度的暗排淹没出流与自由出流排水流量相比减少的百分比基本相同。以淹没深度为 0.3D、积水层深度为 7 cm 为例,其他条件相同时,与自由出流的排水流量相比,Cs - 0、Cs - 2、Cs - 4、Cs - 6 试验处理的排水流量分别减少 33.8%、29.8%、32.6%、34.5%;Fs - 0、Fs - 2、Fs - 4、Fs - 6 的排水流量分别减少 20.6%、23.7%、23.0%、21.3%。

同样地,由表 2 可知,地表积水、土体饱和条件下,改进暗排较常规暗排排水流量增大的百分比与出流方式无关。以细砂土介质、积水层深度 7 cm 为例,与常规暗排的淹没出流排水流量相比,反滤体宽度为 2、4、6 cm 的改进暗排淹没出流排水流量增加了 119.2%、156.6%、200%,其增加的百分比与自由出流条件接近。此外,暗排淹没出流比自由出流排水流量减少的百分比随积水层深度的增加而减少。积水层深度分别为 7、5、3 cm 时,不同暗排型式中淹没出流较自由出流排水流量平均减少 22.1%、23.6%、24.8%。

3.4 暗排排水流量实测值与计算结果对比

利用渗流面积相等排水渗流量相同的假定,折算得到土柱试验的暗管间距 $b = 14.77$ cm。以积水层深度 $\Delta H = 7$ cm、细砂土介质条件下的自由出流为例,根据试验的各项尺寸和实测各项参数,将实测与理论计算排水流量列于表 3 中。

表 3 实测和计算的暗排排水流量对比

Tab. 3 Comparison of observed and calculated drainage discharges

暗排类型	反滤体宽度/cm	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	H/cm	H_d/cm	实测值/ $(\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1})$	计算值/ $(\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差/%
常规	0	0.001 39	77.5	55.55	0.505	0.490	-3.05
	2	0.001 28	77.5	55.80	1.152	0.979	-15.0
改进	4	0.001 44	77.5	55.60	1.337	1.353	1.2
	6	0.001 35	77.5	56.05	1.527	1.579	3.4

由表 3 可以看出,采用现有的经典公式计算常规暗排排水流量,其结果与实测值吻合很好,相对误差只有 3.05%,完全满足计算精度要求,表明所选

取的常规暗排排水流量经典理论计算公式具有较高的精确度,也说明本试验设计合理,结果可靠。改进暗排排水流量的理论值与实测值也比较接近,除反

滤体宽度 2 cm 外,其它反滤体宽度的计算结果与实测值相比吻合较好,相对误差小于 5%,而反滤体宽度为 2 cm 时误差较大的原因可能是改变反滤体宽度时,周边介质有所扰动,土体渗透系数测算误差所致。总体来说,针对改进暗排提出的排水流量计算公式在地表积水土体饱和条件下是合理可行的,该计算方法还有待在实践中做进一步检验。

4 讨论

与常规暗排相比,改进暗排通过扩大进水面积,增加汇入暗管的积水入渗水量,能够明显提高其排水能力,在除涝治渍方面都能发挥积极作用。实际工程建设条件下,在开沟铺管过程中,可以同步铺设反滤体,因此,不需增加土方工程量,只是增加了反滤料用量,从经济角度考虑,可根据当地实际情况就地取材,或采用木屑、秸秆、炉渣等强透水性、低成本材料替代。田间铺设时,反滤体宽度可取 20~40 cm 或更宽,暗管埋深可取 0.8~1.0 m 或更浅,具体参数应根据工程实际情况、排水效果、工程成本及其产生的效益进行综合优化布局后选择。长远角度来看,改进暗排与明沟排水相结合是灌区农田涝灾防御的

有效途径之一,将会产生显著的效益。其田间应用效果和净化水质作用还有待进一步研究,也包括砂砾石反滤体合理级配的选择、其防淤堵性能以及土壤流失问题等。

5 结论

(1)土体饱和地表积水条件下,常规暗排和改进暗排都具有一定的排水能力,能够加大田间入渗量,加快消除田面积水,减轻沥涝造成的危害,从而充分肯定暗管排水工程在除涝中的积极作用。

(2)改进暗排工程的排水除涝作用明显,尤其对渗透系数小的细砂土介质效果更显著。反滤体宽度为 2~6 cm 的改进暗排排水流量为常规暗排排水流量的 2~3 倍,且土体渗透性与反滤体渗透性的差别越大,增设反滤体对于增大排水流量的作用越明显。淹没深度为 0.3 倍暗管埋深时,改进暗排的排水流量仍然可观。

(3)提出土体饱和地表积水条件下改进暗排的排水流量计算公式,并与试验结果进行对比,两者吻合很好,表明提出的改进暗排排水流量计算公式是合理可行的。

参 考 文 献

- 1 国家防汛抗旱指挥部,中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2006-2012.
- 2 田苗,李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. 农业机械学报,2015,46(5):252-257.
TIAN Miao, LI Weiguo. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought and flood based on TRMM remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):252-257. (in Chinese)
- 3 王少丽,许迪,陈皓锐,等. 农田除涝排水技术研究综述[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(4):343-349.
WANG Shaoli, XU Di, CHEN Haorui, et al. A review on farmland drainage and management research[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4):343-349. (in Chinese)
- 4 SHARMA D P, GUPTA S K. Subsurface drainage for reversing degradation of waterlogged saline lands[J]. Land Degradation and Development, 2006, 17(6):605-614.
- 5 李法虎, KEREN R, BENHUR M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间异性分析[J]. 农业工程学报,2003,19(6):64-69.
LI Fahu, KEREN R, BENHUR M. Analysis of spatial variability of soil characteristics and crop yield under subsurface drainage [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6):64-69. (in Chinese)
- 6 GRAZHDDANI S, JACQUIN F, SULCE S. Effect of subsurface drainage on nutrient pollution of surface water in south eastern Albania [J]. The Science of Total Environment, 1996, 199(1-2):15-21.
- 7 王少丽. 基于水环境保护的农田排水研究新进展[J]. 水利学报,2010,41(6):697-702.
WANG Shaoli. Advancement of study on farmland drainage technology based on water environment protection [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6):697-702. (in Chinese)
- 8 王少丽,张友义,李祥福. 涝渍兼治的明暗组合排水计算方法探讨[J]. 水利学报,2001,32(12):56-61.
WANG Shaoli, ZHANG Youyi, LI Xiangfu. Calculation method of combining open channel and pipe drainage for controlling concurrent waterlogging and water table rising[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(12):56-61. (in Chinese)
- 9 张建国,金斌斌. 土壤与农作[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
- 10 钱龙,王修贵,罗文兵,等. 涝渍胁迫对棉花形态与产量的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(10):136-143.
QIAN Long, WANG Xiugui, LUO Wenbing, et al. Effects of waterlogging stress on morphology and yield of cotton [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):136-143. (in Chinese)
- 11 National Institute of Hydrology. Rigorous derivation of Hooghoudt's equation for the drainage spacing[R]. National Institute of Hydrology, India, 1998.
- 12 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2003.

ZHANG Qiuyan, ZHANG Fuping. Determination of nutritional components in different potato varieties[J]. Food and Nutrition in China, 2010(6):75 – 77. (in Chinese)

11 董晓宇, 孙守如, 杨秋生, 等. 碳氮比和氮源配比对玉米秸基质发酵效果的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008,42(2): 167 – 179.

DONG Xiaoyu, SUN Shouru, YANG Qiusheng, et al. Effect of carbon-to-nitrogen ratios and nitrogen resources on the corn stalk fermentation for substrate production[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008,42(2):167 – 179. (in Chinese)

12 LUO Q M, LI X J, ZHU B N, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2):111 – 115.

13 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):211 – 217.

BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):211 – 217. (in Chinese)

14 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):291 – 296.

CUI Ming, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12):291 – 296. (in Chinese)

15 潘君廷, 邱凌, A. A. M. Hassanein, 等. 生物炭添加对鸡粪厌氧消化产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2014,45(12): 229 – 233.

PAN Junting, QIU Ling, A. A. M. HASSANEIN, et al. Orthogonal experiment on biogas production characteristics of chicken manure with biochar [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):229 – 233. (in Chinese)

16 李东, 叶景清, 孙永明, 等. 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究[J]. 农业机械学报, 2013,44(1):101 – 105.

LI Dong, YE Jingqing, SUN Yongming, et al. Continuous anaerobic co-digestion of rice straw and cow manure for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):101 – 105. (in Chinese)

17 袁志发, 周静芊. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 346 – 387.

18 赵凤敏, 李树君, 方宪法, 等. 中心组合设计法优化马铃薯薯渣固态发酵工艺[J]. 农业机械学报, 2006,37(8):45 – 48.

ZHAO Fengmin, LI Shujun, FANG Xianfa, et al. Optimization of potato residues solid substrate fermentation technology using central composite design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8):45 – 48. (in Chinese)

19 DRAPER N, JOHN J A. Response-surfaces designs for quantitative and qualitative variables[J]. Technometrics, 1988,30(4): 423 – 428.

20 WANG G, MU Y, YU H Q. Response surface analysis to evaluate the influence of pH, temperature and substrate concentration on the acidogenesis of sucrose-rich wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2005,23(2):175 – 184.

21 李艳宾, 张琴, 李为, 等. 接种量及物料配比对棉秆沼气发酵的影响[J]. 西北农业学报, 2011,20(1):194 – 199.

LI Yanbin, ZHANG Qin, LI Wei, et al. Effects of inoculation quantity and material proportion on biogas fermentation of cotton stalk[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011,20(1):194 – 199. (in Chinese)

22 刘丹, 李文哲, 刘爽, 等. 有机成分比例对餐厨废弃物厌氧发酵特性的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):166 – 172.

LIU Dan, LI Wenzhe, LIU Shuang, et al. Influence of organic ingredients mixing ratio on anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 166 – 172. (in Chinese)

23 荆艳艳, 岳建芝, 王毅, 等. 超微玉米秸秆光合产氢响应面法优化研究[J]. 太阳能学报, 2014,35(1):14 – 18.

JING Yanyan, YUE Jianzhi, WANG Yi, et al. The optimization on ultramicro cornstalk photosynthetic bacteria hydrogen production by response surface methodology[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014,35(1):14 – 18. (in Chinese)

24 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社, 1998: 117 – 121.

(上接第 118 页)

13 刘培斌. 暗管排水稻田中氮素淋失动态混合模型及应用[J]. 中国环境科学,2000,20(1):13 – 17.

LIU Peibin. Application of nitrogen leaching losses mixed simulative model in tile effluent from the drained paddy rice field [J]. China Environment Science, 2000,20(1):13 – 17. (in Chinese)

14 CHRISTIANE L G. Effect of envelopes on flow pattern near drain pipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1989, 115(4):626 – 641.

15 KABOOSI K, LIAGHAT A, HOOSSEINI S H. The feasibility of rice husk application as envelope material in subsurface drainage systems[J]. Irrigation and Drainage,2012,61:490 – 496.

16 VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892 – 898.

17 CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research,1988,24(5):755 – 769.

18 瞿兴业. 农田排灌渗流计算及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.