

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

E02B 11/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710005065.5

[45] 授权公告日 2009 年 7 月 8 日

[11] 授权公告号 CN 100510272C

[22] 申请日 2007.2.13

[21] 申请号 200710005065.5

[73] 专利权人 中国水利水电科学研究院

地址 100044 北京市海淀区车公庄西路 20 号

[72] 发明人 王少丽 许迪 瞿兴业 焦平金

[56] 参考文献

CN1542233A 2004.11.3

旱作物涝渍排水研究动态分析. 朱建强等. 灌溉排水, 第 20 卷第 1 期. 2001

宁夏银北干旱和半干旱地区水盐动态和调控措施. 李福祥等. 灌溉排水, 第 20 卷第 3 期. 2001

审查员 都宏博

[74] 专利代理机构 北京三高永信知识产权代理有限公司

代理人 何文彬

权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 2 页

[54] 发明名称

分期分级动态控制农田排水设计方法

[57] 摘要

本发明涉及农业灌溉排水领域, 具体提供一种分期分级动态控制农田排水设计方法。本发明根据对排水的实际需求, 在时间上划分前期、中期、后期三个阶段, 分别提出地下水位动态控制指标, 作为不同级别排水工程的设计标准, 依次相应确定田间、集水和输水(或骨干)等不同级别排水沟(管)的间距, 不但减少各级排水工程的深度, 降低了治理明沟塌坡难度, 使得易于争取到自流排水, 方便管理, 而且提高了田间排水效果, 使排水系统的整体组合更为合理, 本发明较原有方法更适应北方常年灌溉的渠灌区, 适应性强易于实施并能够节省工程投资和管理维护费用。

1、一种分期分级动态控制农田排水设计方法，其特征在于，是根据对排水的实际需求，在时间上划分不同的阶段，分别提出不同时段的地下水位控制指标，作为不同级别排水工程的设计标准，按照所述控制指标具体确定排水明沟深度或排水暗管深度，并通过设计计算确定明沟之间或暗管之间的间距，

其具体方法如下：

A、将全年划分为作物生长期和非生长期两个时间阶段，其动态控制指标分别对应于田间排水工程和输水或骨干排水工程；

B、将每次灌水后的地下水位回落时间再分为前期和中期两个阶段，提出各自的地下水动态控制指标作为设计标准，分别对应于田间末级排水工程和下一级的田间集水排水工程；

C、根据各阶段的动态控制指标，确定各级排水沟管的深度，并通过计算分析确定相应的间距；

排水沟管的间距可用以下通式计算：

计算排水明沟间距的通式为：

$$L = \frac{Ckt}{\mu \ln \frac{H_0}{H_t} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{B})}$$

计算排水暗管间距的通式为：

$$L = \frac{Ckt}{\mu \ln \frac{H_0}{H_t} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{\sqrt{(H_0 - H_t)d / \ln H_0 / H_t}})}$$

式中：L 为不考虑地下水蒸发影响，非稳定渗流情况下的排水明沟或排水暗管间距（m）； $C=\pi/\Omega$ ，为区分明沟和暗管的分类系数，对于明沟取 $\Omega=0.7$ ， $C=4.49$ ；对于暗管取 $\Omega=0.8$ ， $C=3.93$ ；k 为排水地段含水层平均渗透系数（m/d）；t 为设计要求的地下水位降落历时（d）； μ 为地下水面变化范围内土层的给水度； H_0 和 H_t 为降落时段始末时刻，排水地段中部地下水位高于沟中水位或高于暗管中心的作用水头（m）；B 为窄深沟中水面宽度（m）或充水部分梯形断面的折算直径（m）；d 为含外包料的暗管外壁的直径（m）； C_1 、 C_2 为分级系数，可由下表查出：

隔水层埋深的 “模糊档次”分级*	代表相对埋深的 L/D 比值（近似值）	明沟（C=4.49）		暗管（C=3.93）	
		C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
极深	L/D=0, D=∞	0	0.637	0	0.356
较深	L/D=3	1.178	0.212	1.178	0.119
较浅	L/D=5	1.963	0.127	1.963	0.071
很浅	L/D=7	2.749	0.091	2.749	0.051

表中 D 为隔水层的埋深。

2. 根据权利要求 1 所述的一种分期分级动态控制农田排水设计方法，其特征在于，对于前期，定义为灌水后的 3-5 天，要求由高地下水位下降到 0.6~1.0 米的治渍深度，相应设置的田间明沟深度为 1.5 米~1.6 米，暗管深度 1.3 米~1.4 米；对于中期，定义为前期结束后的 5-10 天，要求地下水位继续下降达到 1.0~1.5 米的改盐深度，相应设置的明沟深度为 1.9~2.0 米，暗管深度为 1.7~1.8 米。

3、根据权利要求 1 所述的一种分期分级动态控制农田排水设计方法，其特征在于，对于灌水间歇期超过一个月且在此期间无第二次灌水也无明显降雨的情况以及灌水期结束后，除了上述两个阶段之后，再划分出后期阶段，提出地下水动态控制指标作为设计标准，对应于输水或骨干排水工程；

对于后期，定义为中期结束后 10 天以上到 1 个月或更长时间，输水或骨干明沟深度在 2.3 米-2.5 米。

4、根据权利要求 1 所述的一种分期分级动态控制农田排水设计方法，其特征在于，当按照设计标准确定田间末级排水明沟的间距小于 100 米时，选用暗管排水方案。

分期分级动态控制农田排水设计方法

技术领域

本项发明涉及农业灌溉排水领域，具体提供一种根据设计新标准确定排水系统合理规格的分期分级动态控制农田排水设计方法。

背景技术

现有技术下，有防治盐渍化要求的北方渠灌区，普遍以临界深度作为应达到的控制降深指标，用来设计田间末级排水工程，并依此确定各级排水工程深度与相应的间距规格。但由于现行标准不完全切合实际，其结果往往是田间工程的作用达不到理想的预期效果，排水系统的维护与运转也存在困难。特别是轻质土地区，明沟深度过大，沟坡坍塌问题不易解决，自流条件也难以得到保证，从而影响整体效益的发挥。

农田排水标准通常分为排涝、治渍和防治盐碱三类。在现行有关农田排水的规范中，排涝和治渍标准主要是依据我国南方地区的条件制定的，一般针对积雨成涝和地下淡水的水位过高形成渍害。而防治盐碱化标准则主要是针对我国北方灌区存在盐碱化危害而单独制定的，各有其地域特点，且相互之间无依存关系。事实上，在我国北方地区除了排涝标准的依据和使用与南方有某些共性和相似之处外，治渍和防治盐碱化标准的依据和使用要求则有很大区别。首先，南方所遭遇的是“淡渍”危害，而北方则多受“咸渍”威胁，在治渍设计标准上有质与量的不同；其次，盐碱化为北方所特有，而南方除一些滨海地区受海潮咸水影响外，大都不存在盐碱化的问题。对于北方灌区，特别是面临节水改造的北方大中型灌区来说，区别南方涝渍和北方盐渍危害的排水要求，而制定出更加切合实际的控制地下水位设计标准是一项迫切的任务。

根据调查，我国西北黄河上游和内陆河流域一些大型引黄灌区，由灌溉来水带来的盐量，普遍大于排水排走的盐量，其结果是水盐状况得不到有效平衡，多余盐分长期积累在境内土壤中，使土地盐渍化逐步加重，作物生长受到威胁。加上来水量过多，去水量偏少，余水积存起来使地下水位抬高，形成含盐地下

水的渍害，威胁作物生长。即使在实行节水改造以后，如不相应加强和改善现有排水工程系统，并实施合理运行，这一不利影响因素将仍然不能得到有效控制与消除。

作物生长期（灌溉季节和雨季），根据土壤水盐运行规律，在灌溉水和雨水作用下，土壤中的水分和盐分基本上是以下行运移为主。在北方常年灌溉地带的渠灌区，灌溉期间表土层受到淋洗，多呈脱盐状态，使作物生长受到抑制和威胁的因素，往往是含有一定数量盐分的过高地下水位带来的不良影响（或简称为“咸水渍害”）。为了给作物创造良好的生存条件，需要在每次灌水后较短时间内快速降低地下水位，以及时消除这种“咸水渍害”的威胁，同时，通过排水排盐，减轻盐碱对作物的危害，这一任务通常由田间排水系统来完成。非作物生长期（灌溉季节和雨季结束后），较长时期内无灌溉水和雨水淋洗，只有蒸发影响，土壤中的水分与盐分在蒸发和毛管水作用下，总体呈向上运移趋势，在这种情况下，为避免表土和耕层土体强烈积盐，危害来年作物生长，特别是幼苗期的生长，防止土壤次生盐渍化，控制更深层次土壤中的水盐就成为输水排水和骨干排水工程的主要任务。为此，可采用在生长期灌溉结束后到来年春灌前，将地下水位逐渐降低到或接近于防治土壤产生盐渍化的临界深度。

以往设计以控制地下水位防治盐渍化为目标的农田排水工程，沿袭前苏联和欧美的传统作法，都是从末级固定田间排水沟（管）承担整个排水任务出发来进行设计。通常在工程设计计算中，采用两种不同的方法：当使用稳定流公式计算排水沟（管）间距时，由田间末级排水沟（管）负担排除的流量，是按设计排水率分布到控制面上所形成的水量考虑；而使用非稳定流公式计算时，则是要求在规定时间内，地下水位一次降低到需要控制达到的最大深度。

根据《灌溉与排水工程设计规范》（国标）和《农田排水工程技术规范》（行标），田间末级固定排水沟和吸水管间距计算公式为：

$$L = \frac{kt}{\mu \Omega \Phi \ln \frac{H_0}{H_t}} \quad (1)$$

式中：L 为不考虑地下水蒸发影响，非稳定渗流情况下的排水沟（管）间距（m）；k 为排水地段含水层平均渗透系数（m/d）；t 为设计要求的地下水位降落历时

(d); μ 为地下水面变化范围内土层的给水度; Ω 为地下水面形状校正系数, 明沟采用 $\Omega = 0.7 \sim 0.8$, 暗管采用 $\Omega = 0.8 \sim 0.9$; Φ 为排水地段的渗流阻抗系数, 当含水层厚度有限 ($D \leq L/2$) 时, 可表示为:

$$\text{对于明沟: } \Phi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2D}{\pi B} + \frac{L}{8D} \quad (2)$$

$$\text{对于暗管: } \Phi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{D}{\pi \sqrt{\Omega H d}} + \frac{L}{8D} \quad (3)$$

当含水层厚度很大 ($D \geq L/2$) 时:

$$\text{对于明沟: } \Phi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2L}{\pi B} \quad (4)$$

$$\text{对于暗管: } \Phi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{L}{\pi \sqrt{\Omega H d}} \quad (5)$$

式中: D 为沟中水位或暗管中心距不透水层表面的距离 (m); B 为窄深沟中水面宽度 (m) 或充水部分梯形断面的折算直径 (m); d 为暗管外壁 (含外包料) 的直径 (m); $\bar{H}$ 为非稳定渗流情况下, 按降落过程平均的作用水头 (m), 用下式计算:

$$\bar{H} = \frac{H_0 - H_t}{\ln H_0 / H_t} \quad (6)$$

式中: H_0 和 H_t 为降落时段始末时刻, 排水地段中部地下水位高于沟中水位或高于暗管中心的作用水头 (m)。

由于 L 在上述间距计算公式组合中呈隐函数形式, 故需采用试算法或迭代法逐次逼近求值。同样公式组合也可用于计算其它各级排水沟 (管) 的间距。水文地质参数 k 和 μ 宜采用现场实测的多点综合平均值。

用现行方法所得结果存在的不足之处为:

1、末级固定沟 (管) 的有效深度 (或埋深) 至少应比当地条件的临界深度值大 $0.2\text{m} \sim 0.3\text{m}$ 。以此为基础, 往下逐步加深各级排水工程, 直至排水干沟和总出水口。以一般中度透水的粉质壤土为例, 防治盐碱化的地下水临界深度大致在 2m 左右, 田间末级固定沟 (管) 的深度, 按传统设计要求, 通常将达到 $2.3\text{m} \sim 2.5\text{m}$ 。若往下推算三级 (斗、支、干), 每级衔接高差按 0.2m 计, 排

水干沟深度将达到 3.0m 左右,至排水总出口处,要求达到的出流水位将更低,一般情况下,自流排水很容易受阻。

2、在末级固定沟(管)深度较大的情况下,计算出来的间距相应较大,由于受到各种因素制约,实际深度难以达到设计要求,使得排水工程控制地下水位和防治盐碱化的作用相对削弱,往往是距沟近处效果尚明显,稍远处则较差,沟(管)中间部位更差,结果表现为治理效果在控制范围内分布极不均匀。

3、由于各级排水沟深度都较大,在多数易渍、易碱的轻质土地地区,排水沟边坡坍塌、沟道淤积问题十分突出,成为制约这些地区发展农田排水工程的一大瓶颈;而逐级治理坍塌、淤积问题,不仅工程费用高,而且管理难度大,在沟道普遍很深的情况下,往往难以根治。

4、排水总出口处遇容泄区水位顶托而限制自流排水的情况时有发生,在自流排水困难的条件下,必须建立抽排泵站,由此将增加一笔相当可观的建站工程投资,而且常年运行当中的电费负担较重,往往无从落实,也难以维持。

发明内容

本发明的一种按分期分级动态控制标准进行农田排水设计的方法是针对以上不足之处,采用新的排水标准与设计方法,在能够达到控制要求的前提下,在合理可行的范围内,尽可能减小各级排水工程的深度,从而为避免上述不利因素和减轻其有害影响提供现实的可能性。

本发明的一种分期分级动态控制农田排水设计方法,所采用的技术方案是:

对于北方易受盐渍危害的渠灌区,根据其防治要求,区分时间阶段和工程级别,制定不同的地下水位动态控制指标,作为排水设计标准。在时间阶段上,区分作物生长期(包括灌溉期及雨季)和非生长期,在工程级别上,区分田间与集水工程和输水与骨干工程,按所承担任务分别制定符合实际要求的动态控制指标。其中,作为田间与集水排水工程设计标准的地下水位控制降深,将普遍小于当地的临界深度,依此按衔接要求逐渐加深到输水与骨干排水工程,应用上述新标准和相应推出的设计新方法,其结果将使整个排水系统的深度和间距规格更趋于合理与完善,克服由于按原有标准设计所带来的缺陷和不足,并且使新的排水系统能够起到预期的作用,满足防治任务要求。

根据对排水的实际需求，在时间上划分不同的阶段，确定各阶段的防御目标，明确防治要求，分别提出不同时段的控制指标，作为不同级别排水工程的设计标准，称为“分期分级控制”。将以往由田间末级一次性承担的排水控制任务由各级分次承担完成，即将全年划分为作物生长期和非生长期两个阶段，分别对应于田间排水工程和输水或骨干排水工程；将灌水后的地下水位回落时间再分为前期和中期两个阶段，分别对应于田间末级排水工程和下一级的田间集水排水工程；对于灌水间歇期很长的情况（超过一个月或更多时间无第二次灌水也无明显降雨）以及最后一次灌水结束后，除了上述两个阶段以外再划分出第三阶段—后期。各个阶段的时间不同，一般是前期短暂，中期稍长，后期较长，并且各阶段彼此链接。

在常年渠灌区地下水位高的条件下，按各阶段的防治任务设置动态控制指标（见图1）和相应级别排水工程规格的确定准则为：

1、前期：灌溉期间，通过灌溉水的淋洗作用和土壤含水率上大下小的分布状况，土体中水盐运行特点是以下行为主，特别是灌水后的最初几天，对作物有危害性的并不是土壤含盐量过高和土壤溶液浓度过大，而是由于含有一定盐分的地下水位持续过高，造成“咸水渍害”，对作物产生威胁。因此，在这一时期，排水工程应发挥的作用是快速降低灌水所引起的高地下水位，消除咸渍危害。参照《灌溉与排水工程设计规范》（国标）和《农田排水工程技术规范》（行标）所制定的治渍排水工程设计标准，可采用旱作区在灌水停止后3~5天内将地下水位由高水位降至埋深0.6~1.0m；水稻区在晒田期4~5天内由接近地表降至0.6~1.0m。这个时期的防治渍害任务，主要由田间末级固定排水沟（管）承担，其工程规格也按照此要求来确定。对于新设计的一般情况，末级沟（管）的深度可按治渍最大降深加0.3m的“剩余水头”，再加0.2~0.3m的沟中水深（暗管为管径0.06~0.1m），即明沟深度达1.5m~1.6m（暗管1.3~1.4m）就基本可行。其间距可按上述降深要求指标用非稳定流公式计算确定。由此得出的结果，虽然间距比现行方法得出的要小一些，但面上排水效果均匀度的提高是其最大优点。此外，减小了田间末级排水沟（管）的深度，从而逐级减小整个系统排水工程的深度，避免或减轻一系列不利因素的产生是其最大的、不可取代的优势。当设计计算结果表明，田间末级固定工程采用排水明沟的间距过密（例如不到100m或更小）时，改为暗管排水方案是最佳选择。对

于已有明沟排水系统的灌区进行改建和提高的情况，则视现有末级明沟能够接纳排水的深度，按埋深最大而又能保证自流排水的原则确定暗管的深度。如果深度足够，也可以按田间排水沟（管）同时负担前期和中期的任务来进行设计。

前期地下水位距地面较近情况下，虽然降落过程中受蒸发影响有一些水量散失，但由于时间短暂，损耗的水量相对较小，可以在计算中忽略不计，一方面使计算方法简化，容易实施；没有考虑短期内蒸发的影响，在满足同一控制指标下的计算结果与考虑蒸发出入不大，且偏于安全。高水位期只计算发挥主要作用的田间末级排水工程，而其它各级工程的作用可暂不计入，与实际差别不大，也留有余地和偏于安全。

2、中期：经过3~5天的前期降落过程后，如果没有明显降雨过程或灌水补充，地下水位将继续降落，这一阶段延续了前期水盐向下运行的特点，但速度放缓，而渍害威胁基本消除。这个阶段排水工程的主要任务则转变为进一步控制地下水位，加速水盐下移进程，主要满足改盐要求，并在一定程度上起到一些防盐作用。参照国标和行标规范中防治土壤盐碱化排水标准，适当加以调整，提出中期控制地下水位指标为：在5~10天内将地下水位降到满足改盐要求的适宜深度，大致相当于将临界深度减小约0.5m，一般情况下轻质土地区约在1.50m左右。

中期以改盐为主的控制地下水位任务，由田间末级的下一级集水排水工程来承担，参照上述要求，这一级明沟的深度将在2.0m左右，暗管则在1.8m左右，其间距同样可使用非稳定流公式计算确定。由于这一阶段地下水位有可能已降低到1.0m以下，受蒸发影响相对减弱，且降落历时也不会太长，计算中不考虑蒸发出入不大，同样也偏于安全。在中期，深度不大的田间末级排水工程的作用已经减弱，计算中只考虑田间二级或集水排水工程的作用，也未考虑其它级别的作用，同样与实际差别不大，也偏于安全。如果田间末级固定沟（管）下一级的集水排水工程也采用暗管，为达到中期控制地下水位的要求，该级暗管应当做成滤水管。

3、后期：灌水停止后间隙期很长或最后一次灌水后到翌年的春灌前，在较长的时段里，由于土壤中水分分布状况的改变和长时期受蒸发影响，土壤中水盐将逐渐由下行转为上行，出现表土积盐的机率增加。这一阶段进一步控制地下水位达到更深的程度，对于防盐来说是十分必要的，这一任务应由输水或

骨干排水系统来完成。控制指标是在 10 天以上到 1 个月或更长时间内, 将中期结束时达到的地下水位由改盐适宜深度降到防盐要求的临界深度。根据这一要求, 输水或骨干排水明沟的深度, 最好能够达到控制临界深度的要求, 即一般情况下, 支、干两级宜分别达到 2.3~2.5m 或略深一些, 其间距仍按《规范》推荐的公式计算。由于后期地下水位已经很低, 可以不考虑蒸发影响, 田间各级排水工程作用都趋于微弱, 也可以不予计算。

下面给出分期分级动态控制排水设计方法的计算通式:

鉴于沟底(或管中心)以下隔水层的埋深 D 通常很难准确界定, 而计算公式中又必须包含这一因素。同时, 考虑到原有的计算公式层次较多, 使用起来比较繁琐。因此, 在本项研究中, 对原有的计算排水沟(管)公式系列加以改进, 将原公式(2)、(3)中包含的未知数 D , 用按 L/D 比例划分“模糊档次”的方法进行近似处理; 同时, 把公式(1)、(2)、(4)和(6)合并成计算明沟间距的单一通式(7); 公式(1)、(3)、(5)和(6)则合并成计算暗管间距的单一通式(8)。通式中增加的几个系数值, 可通过查表得到。因此, 只需选择某种“模糊档次”的分级, 而无需提供具体的 D 数值, 就可以按已知各条件和选取的分级进行间距计算, 不仅计算过程得到简化, 易于实施操作, 而且所得出的的计算结果能满足设计上的精度要求。

计算排水明沟间距的通式为:

$$L = \frac{Ckt}{\mu \ln \frac{H_0}{H_i} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{B})} \quad (7)$$

计算排水暗管间距的通式为:

$$L = \frac{Ckt}{\mu \ln \frac{H_0}{H_i} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{\sqrt{(H_0 - H_i)d / \ln H_0 / H_i}})} \quad (8)$$

式中: $C = \pi / \Omega$, 为区分明沟和暗管的分类系数。对于明沟取 $\Omega = 0.7$, $C = 4.49$; 对于暗管取 $\Omega = 0.8$, $C = 3.93$ 。在试算间距过程中, C 值保持固定不变。 $C_1 = \pi L / 8D$, 为分级系数, 按所选取的“模糊档次”级别查表 1 得到, 此数值对于明沟和暗管都相同。 C_2 也是分级系数, 同样按所选取的“模糊档次”级别查表 1 得到, 但对于明沟和暗管, C_2 的取值不同。各系数值都可按所选取的“档次”级别直接查表得到。

表 1 按 L/D 比值划分“模糊档次”的分类和分级系数

隔水层埋深的	代表相对埋深的 L/D	明沟 ($C=4.49$)	暗管 ($C=3.93$)
--------	---------------	-----------------	-----------------

“模糊档次”分级*	比值（近似值）	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
极深	L/D=0, D=∞	0	0.637	0	0.356
较深	L/D=3	1.178	0.212	1.178	0.119
较浅	L/D=5	1.963	0.127	1.963	0.071
很浅	L/D=7	2.749	0.091	2.749	0.051

当 $L/D < 3$ 时，隔水层埋深 D 对间距的计算结果基本上不产生影响，故 $L/D=0$ 和 3.0 之间无须再分级。

本发明的一种分期分级动态控制农田排水设计方法具有以下有益效果：

- 1、以生长期治渍和改盐要求的动态控制标准设计田间与集水排水工程，突破了以往按临界深度的局限，相应减少各级排水工程的深度，从而降低了治理明沟塌坡难度，易于争取到自流排水，并方便管理。
- 2、按分期、分级动态控制要求设计排水系统，调动了各级排水工程的积极因素，作到了合理衔接和密切配合，既提高了田间排水效果，又充分估计到各分段骨干工程能同时发挥输水与控制地下水（防盐）的双重作用，从而使排水系统的整体组合更为合理。
- 3、新的设计理念和方法，较原有方法更适应北方常年灌溉的渠灌区，特别是在大型灌区改造中，对已有排水系统的整治、改善与增强排水能力方面，适应性强并易于实施。
- 4、按新的标准设计出的排水系统能够节省工程投资和管理维护费用，相应增加经济和社会效益，并有利于环境改善，推动灌区持续稳定发展。

附图说明

下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

图1为本发明的一种分期分级动态控制农田排水设计方法的动态控制标准示意图；

图2为本发明的一种分期分级动态控制农田排水设计方法的动态控制标准示意图（具体实施例）；

图3为本发明的一种分期分级动态控制农田排水设计方法中，间距 L 与相对埋深 L/D 关系示意图；

图4为本发明对计算依据的地下水位动态曲线与实际产生的水位值对照图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明，但不作为对本发明的限定。

实施例：

新疆某渠灌区，位于准噶尔盆地西南部，天山北麓冲积洪积平原。灌区地处亚欧大陆腹地，属典型的西北干旱、半干旱区大陆性气候，作物生长期日照充足，光能资源丰富，对粮棉生长十分有利。年平均气温 $6.5-7.3^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 163-184 天。灌区降水稀少，气候干旱，年降水量在 162~182mm 之间，作物生长期降水占全年的 75% 左右；年蒸发量 1710-2118 毫米，年均相对湿度 56-64%。区内地形平坦开阔，土地集中连片，土层深厚，土质为粉质粘土或壤土。

从地下水资料看，1955 年建团时平均地下水埋深超过 11m，以后在灌溉条件下地下水位呈逐年上升趋势，到 2004 年平均埋深只有 1.59m，由于地下水位较浅和矿化度较高，土地历来受盐渍化威胁。原有为改良盐渍地修建的明沟排水系统，由于间距过大，并且排水沟边坡易坍塌淤积，影响和削弱了田间排水的治理效果。按照本发明分期分级动态控制理念的农田排水设计方法实施，采用半机械化施工方法铺设管道，以农级排水明沟为集水沟，形成明暗组合排水工程，实现自流排水。结合明沟系统疏挖、清淤与整治，以明暗相结合的排水设施为主体，起到了有效治理盐渍化的作用，特别是暗管控制地下水位和排盐作用明显，地下水位普遍降低，示范区的盐渍土地得到改良，取得了增产和增收效益。

以该灌区内 163 和 165 两个条田地块的暗排工程作为设计计算的实例：

已知设计区的水文地质参数为：实测渗透系数的综合平均值 163 条田为 $k=0.36\text{m/d}$ ，给水度 $\mu=0.035$ ；165 条田为 $k=0.62\text{m/d}$ ，给水度 $\mu=0.04$ 。目前田间农沟的水面低于地面不小于 2.0m，为保持暗管出水能够自流入沟，而又能争取到较大的暗管埋深，选取暗管中心的埋深为 1.8m，使暗管出口和农沟水面之间能保持 0.20m 左右的高差，图 2 为设计采用的地下水位动态分期控制标准。由于暗管中心埋深比中期末所要求的控制深度 1.5m 还深 0.3m，可以认为，这种深度的暗管能同时承担田间一、二两级排水的任务。因此，按中期动态控制标准来计算确定排水暗管间距是可行的。由此得作用水头 $H_0=1.8-1.0=0.8\text{m}$ ， $H_c=1.8-1.5=0.3\text{m}$ ；降落历时取 $t=8\text{d}$ ；暗管直径为 $d=0.08\text{m}$ 。将 k 、 t 、 μ 、 d 、

H_0 、 H_1 和 $C=3.93$ 等有关已知数据代入公式 (8), 取几种模糊档次的级别, 查表 1 分别得出各自的 C_1 和 C_2 值, 代入公式中通过迭代逐次逼近, 得出各档次级别间距 L 的计算结果。然后, 通过综合比较, 最终确定一个适合的间距来铺设田间一级排水暗管。其次, 可以按早期控制标准校核选取的暗管间距在满足治渍要求方面的适应性, 并用动态控制标准对现有明沟系统的排水能力进行检验。

按中期控制标准计算确定排水暗管的间距:

将有关各已知数据代入公式 (8), 得到用于计算两条田暗管间距的简化式:

对于 163 条田:
$$L = \frac{330}{C_1 + \ln \frac{C_2 L}{0.202}} ;$$

对于 165 条田:
$$L = \frac{497}{C_1 + \ln \frac{C_2 L}{0.202}}$$

选取隔水层埋深“极深”、“较深”、“较浅”和“很浅”全部 4 种“模糊档次”级别, 查表 1 分别得出各自的 C_1 和 C_2 值, 代入上述公式中做进一步简化; 先试选取初始 L 值, 代入各“档次”级别的简化式中, 得出 L 的第一次近似值, 再将其代入公式中进行第二次计算, 如此循环迭代, 直至逼近所求的值为止, 表 2 为暗管间距计算的最终成果。

表 2 暗管间距计算成果表

分级	分级系数		163 条田			165 条田		
	C_1	C_2	简化式	L 计算结果 (m)	相应的 D (m)	简化式	L 计算结果 (m)	相应的 D (m)
极深	0	0.35	$L=330/\ln 1.762L$	63.8	∞	$L=497/\ln 1.762L$	96.7	∞
较深	1.178	0.119	$L=330/(1.178+\ln 0.589L)$	67.8	23	$L=497/(1.178+\ln 0.589L)$	95.5	32
较浅	1.963	0.071	$L=330/(1.963+\ln 0.351L)$	64.9	13	$L=497/(1.963+\ln 0.351L)$	91.5	18
很浅	2.749	0.051	$L=330/(2.749+\ln 0.252L)$	60.3	9	$L=497/(2.749+\ln 0.252L)$	85.4	12

按代表各档次的相对埋深 L/D 比值, 和通过计算得到的间距 L , 反推出相应的隔水层埋深 D 数值, 列入表中最后一栏, 并绘出 L 与 L/D 的关系曲线图 3。从

计算结果看出,隔水层埋深 D 由最浅($L/D=7$)逐步增大到极深($L/D=0, D=\infty$),相应得到的暗管间距 L 都在较小的范围内变化。以 163 条田为例,当 L/D 由 7 下降到 3,即 D 由 9m 增大到 23m 时,其增加幅度为 156%,而间距 L 的增大幅度却只有 12.4%,还不到埋深增加幅度的 1/10。当 D 由 23m 增大到 ∞ 时, L 的增加幅度减小到 1.47%,几乎没有发生变化。165 条田也显示出同样的规律性。这一现象表明,隔水层埋深 D 只是在很浅或较浅的情况下对间距 L 的计算结果带来一定的影响,并且影响程度并不显著,而在较深情况下则基本上不产生影响。因此,在当地隔水层埋深 D 不能确切界定的水文地质条件下,选用“模糊档次”级别中较浅和极深两种分级系数进行间距计算,在确认得到的两个结果较为接近的情况下,可以取其平均值作为设计使用的间距数值。上述实例中,163 条田的暗管间距可取 67m 左右,165 条田的暗管间距可取 94m 左右。综合考虑其它方面的因素,如明沟系统还有一定的辅助排水作用,以及工程经济方面等因素,可以将计算数值适当放宽一些。最终确定采用的间距是 163 条田为 70m 左右,165 条田为 100m 左右,以此作为暗管排水工程的设计规格进行田间布置。

2. 用早期控制标准校核暗管间距规格的适应性

如前所述,早期动态控制标准要求要在 3~5 天内将地下水位由灌后或雨后高水位降低到距地面 1m 左右的深度。取起始降落时刻有渍害威胁的高水位埋深为 0.4m,在暗管埋深 1.8m 情况下,其作用水头 $H_0=1.8-0.4=1.4$ m,经过历时 t 后,要求达到 1m 深度时的作用水头 $H_t=1.8-1.0=0.8$ m,其他数据不变。将通式 (8) 改写成:

$$t = \frac{L\mu \ln \frac{H_0}{H_t} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{\sqrt{(H_0 - H_t)d / \ln H_0 / H_t}})}{Ck} \quad (9)$$

其中 $C=3.93$,代入相应的已知数值,分别得到用于计算两条田暗管间距的简化式:

对于 163 条田: $t=0.97 \times (C_1 + \ln 239C_2)$

对于 165 条田: $t=0.92 \times (C_1 + \ln 342C_2)$

选取不同级别的 C_1 和 C_2 值,代入上面的简化式中,分别计算出两个条田满足早期控制要求的允许降落历时 $t(d)$,见表 3。

表 3 按早期控制要求需要的降落历时

分级	分级系数		降落历时 t(d)		隔水层相对埋深比值与代表值		
	C ₁	C ₂	163 条田	165 条田	L/D	D(m)	
						163 条田	165 条田
极深	0	0.356	4.31	4.42	0	∞	∞
较深	1.178	0.119	4.39	4.49	3	23	33
较浅	1.963	0.071	4.65	4.74	5	14	20
很浅	2.749	0.051	5.09	5.16	7	10	14

计算结果表明，除遇到隔水层埋深 D 很浅的最不利情况，允许历时略有超出外，其余多数情况下，两个条田所采用间距规格的排水工程，都能够允许在 5 天以内，将早期高地下水位从距地面 0.4m 降低到 1.0m 的深度，满足控制标准的要求。

用动态控制标准对现有明沟系统的排水能力进行检验：

将计算明沟间距的通式（7）改写成：

$$t = \frac{L\mu \ln \frac{H_0}{H_t} (C_1 + \ln \frac{C_2 L}{B})}{Ck}$$

(10)

其中 C=4.49 。

首先用早期控制标准检验现有农沟的排水能力，并评价其作用。在灌水刚结束的初始阶段（早期），农沟水面距离地面约 2.0m，根据早期控制标准的要求，H₀=2.0-0.4=1.6m，H_t=2.0-1.0=1.0m， 计算得 lnH₀/H_t=0.47。取农沟中水深 0.3m，边坡 1：1.5，底宽 0.6，按湿周相等折算出等效半圆的直径为 B=1.0m，其余数据同前。将两条田的各项已知数值代入公式（10），并选取不同“档次”级别的系数 C₁和 C₂，使公式（10）简化，分别得出降落历时 t(d)，计算结果见表 4。表中数值显示，通过计算得出需要的降落历时都超过了允许的 3~5d，表明现有农沟的排水能力达不到早期控制标准的要求，因此，有必要在原有田间末级农沟的基础上增设暗管排水工程，以增强排水作用。

表 4 按早期控制要求需要的降落历时

分级	分级系数		降落历时 t(d)	
	C ₁	C ₂	163 条田	165 条田
极深	0	0.637	9.9	15.3
较深	1.178	0.212	10.1	15.5
较浅	1.963	0.127	10.6	16.1
很浅	2.749	0.091	11.5	17.5

其次，用中期控制标准校核农沟的排水能力，并评价其作用。早期结束中期开始时，地下水位已降到防渍深度 1.0m，农沟水面距地面仍为 2.0m 左右。根据中期控制标准要求， $H_0=2.0-1.0=1.0\text{m}$ ， $H_t=2.0-1.5=0.5\text{m}$ ，计算得 $\ln H_0/H_t=0.693$ 。同上，将两条田的各已知数值代入公式（10），并选取不同的 C_1 和 C_2 系数，计算结果见表 5。计算得出的需要降落历时，都超过了允许的 5~10d，表明现有农沟能力同样达不到中期控制标准的要求，因此，增设暗管排水工程完全必要。

表 5 按中期控制要求需要的降落历时

分级	分级系数		降落历时 t(d)	
	C_1	C_2	163 条田	165 条田
极深	0	0.637	14.5	22.5
较深	1.178	0.212	14.8	22.9
较浅	1.963	0.127	15.6	23.7
很浅	2.749	0.091	17.0	25.8

最后用后期控制标准衡量农沟的排水能力。当灌水结束或停灌以后，经过早、中两期的降落过程，地下水位已达到 1.5m 的深度，按后期控制标准要求历时 10 天或更长的时间，将地下水位降到 2.0m 及其以下，这个阶段的任务对于埋深仅有 1.8m 的暗管来说，是难以完成的，只能依靠深度更大一些的明沟来执行。鉴于中期的控制任务已由深度足够的暗管承担了，到后期阶段，深度更大一些的农沟，能起到输水排水的作用，因此，可使其承担后期的控制任务。根据灌区经验，当灌溉停止后，经过早、中期两个阶段，到后期地下水位已显著降低，明沟流量相应减少，沟中水位也随之下降，以农沟为例，其排水有效深度可达到 2.2m 左右，按此计算作用水头， $H_0=2.2-1.5=0.7\text{m}$ ， $H_t=2.2-2.0=0.2\text{m}$ ，于是得 $\ln H_0/H_t=1.252$ 。将两条田的各项已知值代入公式（10），得出计算结果：163 条田的农沟需历时 $t=29\sim 33\text{d}$ ，比控制标准历时的下限 $t=10\text{d}$ 约大 2 倍；165 条田的农沟需历时 $t=38\sim 44\text{d}$ ，比控制标准历时的下限 $t=10\text{d}$ 约大 3 倍。灌溉停止后，地下水按这样的速度下降尚能容许，若再加上其他级别排水沟的作用，这一历时还会缩短，总体上可满足防盐要求。

用现场实测地下水位验证设计采用的动态标准：

明暗结合的组合排水工程建成后，在现场进行了地下水位动态的跟踪监测，取得测试数据。通过实测资料的整理分析，得到不同时段起始和截止时刻地下水位与降落历时的关系。首先，按各时段控制指标，绘制出动态标准曲线，作为对比的基础；其次，令各次起始时刻的地下水位埋深实测值 $h_{0\text{测}}$ 等于标准值 $h_{0\text{标}}$ ，从曲线上查出相应的起始降落时刻 t_0 (≥ 0)；然后，将各次的实测降落历时加上去，得到截止降落时刻 t ；最后，按同步下降规律，对比该时刻的地下水位埋深实测值 $h_{\text{测}}$ 和标准值 $h_{\text{标}}$ ，求出其相对误差 (%)，用以判断实施工程后，实际产生的地下水位动态，与按标准动态预期发生的是否一致，并表明其吻合的程度，据此对工程设计方法及其结果的可靠性作出评价。

现将计算分析成果列入表 6，并绘成动态图 4 以进行对比。结果表明，实际产生的地下水位动态变化在 1~2m 范围，与设计所采用的动态标准变化趋势完全一致，两者之间的水位埋深相对误差绝对值在 0~7.3%之间变动，其综合平均误差仅 0.47%，表明吻合较好。由于建成的组合排水工程起到了有效的治理盐渍化作用，从另一方面也证明了作为设计采用的动态标准切合实际。

表 6 地下水位动态实测值与设计采用动态标准值对比

条田	测次 序号	观测日期 (起止年/月/日)	时段起始时刻		时段截止时刻			
			t_0 (d)	$\frac{h_{\text{实测}} - h_{\text{标准}}}{h_{\text{标准}}}(\%)$	t (d)	$h_{\text{实测}}(\text{m})$	$h_{\text{标准}}(\text{m})$	相对误差 (%)
163	1	05/07/01~05/07/15	8	1.25	22	1.75	1.78	-1.69
	2	05/10/28~05/11/15	9	1.30	26	1.85	1.83	1.09
	3	06/05/27~06/06/18	11	1.44	32	2.00	1.88	6.38
165	4	05/07/01~05/07/15	6	1.10	20	1.70	1.73	-1.73
	5	05/09/01~05/09/15	12	1.50	26	1.95	1.83	6.56
	6	05/05/27~05/06/07	12	1.50	22	1.65	1.78	-7.3
	7	05/05/27~05/06/18	12	1.50	33	1.85	1.85	0

此外，本发明还引入下述排水规划与设计的补充内容：

- 1、对北方渠灌区、井灌区和渠井结合灌区应制定不同的排水标准。现行的按临界深度要求控制地下水位的田间排水工程设计标准，应限定其使用范围。
- 2、对北方已建（含改造）或新建的渠灌区，应区分田间、集水、输水和骨干排水工程所担负的治渍与防治盐碱化任务，分别提出不同的控制地下水位要求，并相应制定符合当前灌区实际情况的排水设计标准。
- 3、对于北方常年灌溉的渠灌区，在作物生长期（灌溉季节和雨季），田间

和集水排水系统应主要担负控制浅层地下水，达到治渍和提高改盐效果的任务，而输水排水系统则主要输送来自田间的排泄水，并进一步控制地下水；在非生长季节里，输水和骨干排水系统应主要承担控制较深层地下水和防盐的任务。

4、对于北方常年灌溉的渠灌区，应按治渍和改盐要求，制定出适合（可小于临界深度）的田间排水与集水排水系统地下水位深度控制标准，而不宜沿袭以往一律按临界深度要求的简单作法；至于有防盐任务的输水和骨干系统，则可以参照临界深度要求确定排水标准与工程规格，但也需要因地制宜。对于实行节水灌溉和改善排水条件后，能保持良好的水盐平衡状况时，灌区排水系统可以按照小于临界深度的标准进行设计和管理运行。

总体来说，在北方常年灌溉的渠灌区宜采用较浅而密的田间排水与集水排水工程，与较深而稀的输水或骨干排水工程相配合，构成组合式排水系统，综合控制地下水位，以形成有利的水盐平衡状况，达到盐、渍兼治的要求。在排水设计方面，应采取分段与连续相结合的地下水位动态控制指标进行排水工程设计。

以上所述的实施例，只是本发明较优选的具体实施方式，本领域的技术人员在本发明技术方案范围内进行的通常变化和替换都应包含在本发明的保护范围内。

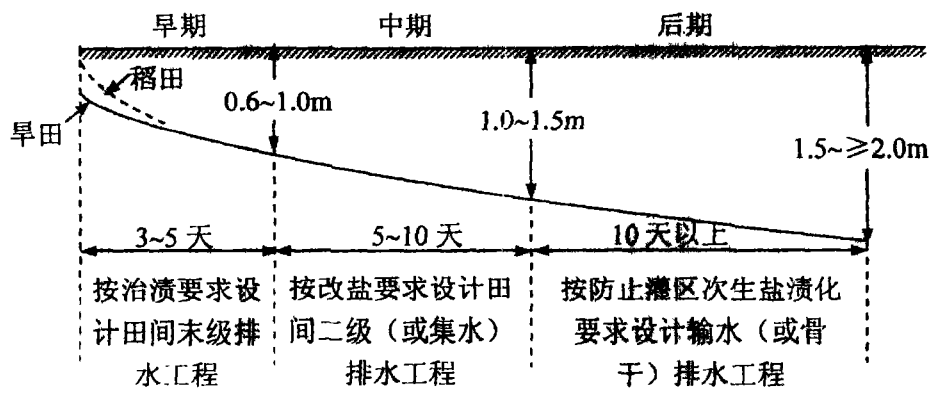


图 1

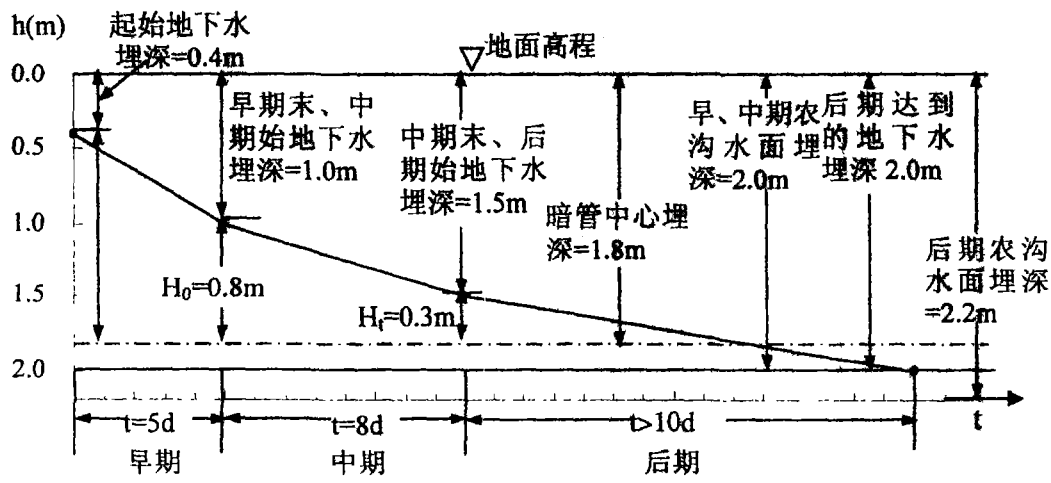


图 2

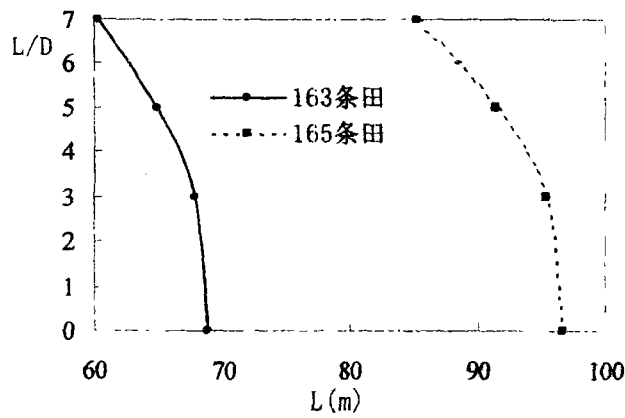


图 3

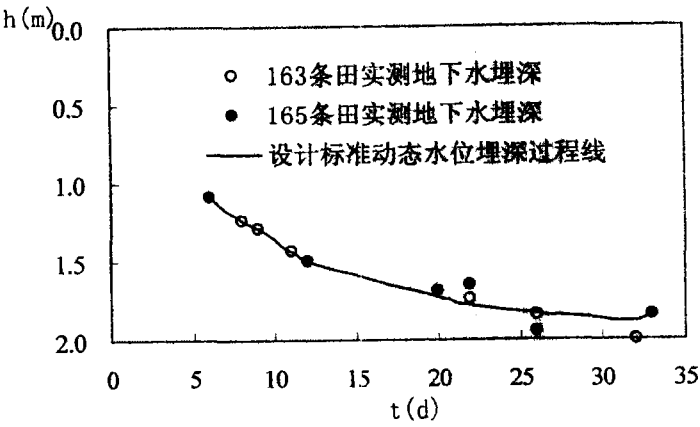


图 4