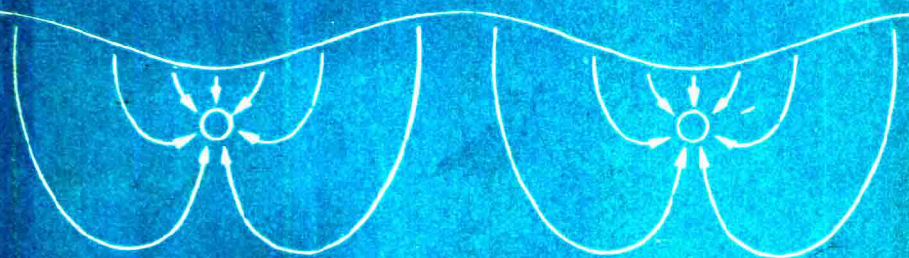


农田地下排水技术

—— 培训研究班报告选编 ——



水利电力部科学技术司
1985年8月

农田地下排水技术

—培训研究班报告选编—

水利电力部科学技术司

1985年8月

前 言

为提高我国从事农田地下排水科技人员的技术水平，更好地为改造渍害低产田和改良盐碱地服务，水利电力部科学技术司、农田水利司委托水利水电科学研究院水利所，南京水利科学研究院水工所、江苏省昆山农田排灌研究所，于1984年10月下旬至11月初在江苏昆山举办了“农田地下排水技术培训研究班”。参加这期培训研究班的成员，有多年从事农田地下排水研究工作的部分教授和专家，还有长期从事这项工作的部分工程技术人员。该班所研究的范围较广，内容也较丰富，从排水理论到实践上，对我国南、北方的排水技术都进行了比较广泛、深入的交流和研讨。

本《选编》以这期“培训研究班”的报告为主，并补充部分内容整理汇编成册。全书共编入报告二十四篇，分为八部分，字数达三十四万。各篇篇幅不等，内容深浅各异，既有学术研究价值，又有指导生产实践工作的现实意义。可供从事农田地下排水研究和实践工作的科技人员参考。

限于印刷条件，《选编》将全部照片均删去。并对各篇的部分内容、文字进行了删节。但因时间仓促，水平所限，错误之处在所难免，呈请读者批评指正。

《选编》由张华、张友义同志任主编，陈炯新、瞿兴业同志审定。

编者

目 录

前言

第一部分 排水渗流计算

- §1-1 有关排水渗流计算的几个问题…………… (1)
- §1-2 田间排水沟的恒定渗流计算…………… (37)
- §1-3 农田地下水的排水计算…………… (55)
- §1-4 农田地下排水沟、管间距的几种计算方法…………… (68)

第二部分 规划设计

- §2-1 农田地下暗管排水规划设计概述…………… (84)
- §2-2 山东陵县“项目区”暗管排水试验工程
规划设计报告 …………… (101)
- §2-3 天津郊区农田暗管排水系统规划设计 …… (138)

第三部分 管材与外包料

- §3-1 国内应用的刚性管材品种及质量概述 …… (148)
- §3-2 水泥土管及外包料 …………… (158)
- §3-3 塑料排水管及其外包材料 …………… (210)
- §3-4 混凝土滤管及外包材料的选择 …………… (234)

第四部分 施工技术

- §4-1 开沟铺管施工及其在地下排水中的应用…(260)
- §4-2 甘肃景泰地区使用 IKP-250 开沟铺管
机的施工技术 …………… (271)
- §4-3 荷兰 S-90 型开沟铺管机的应用 …………… (284)

第五部分 经济效益分析

- §5-1 暗管排水工程经济效益分析方法 …………… (296)

第六部分 排水试验

- §5-1 山东滨海盐碱地暗管排水试验方法 (314)
- §6-2 江苏昆山麦田排水测试方法 (355)
- §6-3 江苏昆山稻田排水试验方法 (372)

第七部分 鼠洞排水

- §7-1 南方五省鼠洞排水技术调查报告 (384)
- §7-2 江苏常熟农田鼠洞排水效果 (412)
- §7-3 农田鼠洞排水施工技术 (427)

第八部分 国外概况

- §8-1 国外农田排水 (442)
- §8-2 日本的农田暗管排水 (454)
- §8-3 巴基斯坦东开普尔暗管排水工程介绍 ... (471)

第一部分 排水渗流计算

§ 1-1 有关排水渗流计算的几个问题

一、作物对农田水盐动态的要求与排水标准

(一) 农作物对土壤水盐动态的要求

农田水分常以地面水、土壤水和地下水三种形式存在，而土壤水则是农田水分存在的基本形式，也是与作物生长关系最密切的水分存在形式。

土壤水按其形态不同可分为汽态水、吸着水、毛管水和重力水等，在这几种土壤水分形式之间并无严格的分界线，其所占比重视土壤质地、结构、有机质含量和温度等而异。可以假想在地下水面上有一个很高（无限长）的土柱，如果地下水位长期保持稳定，地表也不发生蒸发入渗，则经过很长时间以后，地下水面上将会形成一个稳定的土壤水分分布曲线。这个曲线反映了土壤负压和土壤含水率的关系，亦即是土壤水分特征曲线。这一曲线实际上可以通过一定的试验确定。而在土壤吸水和脱水过程中得到的水分特征曲线是不同的，这种现象常称为滞后现象。曲线表示土壤含水率随着吸力（负压）的增大而逐渐增加的过程，如图-1所示，在曲线中并不能反映水分形态的严格界限。

根据水分对作物的有效性，土壤水又可以分为无效水、有效水和重力水（过剩水）。吸着水紧缚于土粒的表面，一般不能为作物所利用，吸着水的上限（最大分子持水率），即永久凋萎点以下的水分为无效水。相应的土壤负压变化于

7~40巴（一巴约为一个大气压）之间，一般取为15巴。重力水停留在根系层内会影响土壤正常的通气状况，这部分水分也不能为旱作物所利用，有时称为过剩水。

一般将田间持水率作为重力水和毛管水以及有效水和过剩水之间的分界线。在生产实践中又常将灌水两天后土壤所能保持的含水率叫作田间持水率。由于土质不同，土壤释水的速度不同，排除重力水所需要的时间也不同，田间持水率并不是一个稳定的数值，是随时间而变化的。田间持水率数值因土壤质地、结构而不同，与之相应的土壤负压一般变化于 $1/10 \sim 1/3$ 巴之间。

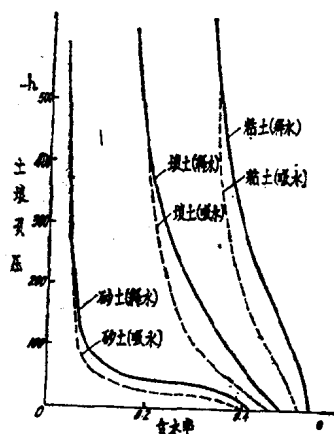


图-1 土壤水分分布曲线

土壤孔隙率与含水率之差为充气孔隙率。为了使土壤内有机质养分通过微生物作用转化为作物可以吸收利用的矿物质养分，需要吸收大量的氧气，同时也需要及时排除由于根系、微生物作用和化学反应而产生的二氧化碳。这些都要通过扩散作用进行气体交换来实现。气体交换的速率主要决定于充

气孔隙率的大小。因此保持土壤有足够的充气孔隙对作物正常生长具有重要的意义。根据文献资料，作物所要求的通气孔隙一般在8~15%之间。有些科技工作者根据玉米生长情况，提出最小充气孔隙率为12~15%，有的则根据番茄的生长情况提出充气孔隙率为4~5%。

由于长期缺 O_2 和 CO_2 过剩将导致作物显著减产，但如持续的时间较短是可以允许的。短时间缺氧对作物的影响程度决定于其持续时间、作物品种、生长阶段、以及光照、湿度和肥料状况等。

农田土壤中含有过多的盐分将影响作物的生长。土壤盐渍化对作物生长的影响随作物的品种和生长阶段而变化。作物允许的含盐量一般应视盐分组成和作物品种而异，根据我国各地资料，一般为0.2~0.3%（干土重）左右。盐分对农作物的危害主要是由于过高的含盐量，会造成盐溶液浓度的增大，引起土壤溶液渗透压力增加，从而影响作物根系自土壤中吸取必要的水分和养料。因此，农作物一方面决定于含盐量大小，另一方面也决定于土壤的含水率。为了保证作物的正常生长，在土壤含水率降低到最小限度（干旱季节或灌水前）时，也应使土壤中溶液的浓度保持在允许的标准以下。

（二）农田水盐动态与地下水动态的关系

农田土壤过湿，通气状况不良主要是由于地表水或降雨的入渗和地下水位过高而引起的。在地下水埋深较小，作物根系吸水层上有降雨或地表水入渗补给，下有上升毛管水顶托的情况下，很容易引起农田渍涝现象。剖面上含水率的变化如图-2所示。

图-2中曲线O是降雨前的土壤含水率分布曲线。降雨过程中由于不断

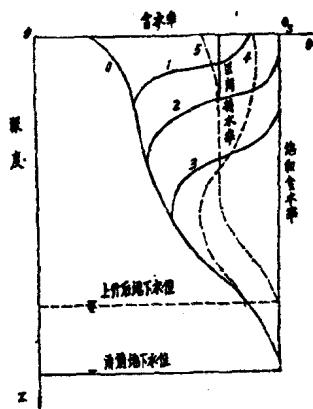


图-2 土壤剖面含水率变化曲线

发生入渗补给，土壤含水率不断增加，如曲线 1、2、3 所示。地面水的补给量愈大，入渗的水量达到的深度愈大。当地面水的补给量超过地下水面以上土层的持水能力（持水曲线）时，即引起地下水位的上升，如图-2虚线所示。在上升毛管水进入作物根系吸水层的情况下，地下水位的高低将直接影响根系吸水层的含水率，见图-3所示。在长期降雨入渗的情况下，地下水位可能上升至地表，而与地面水衔接。

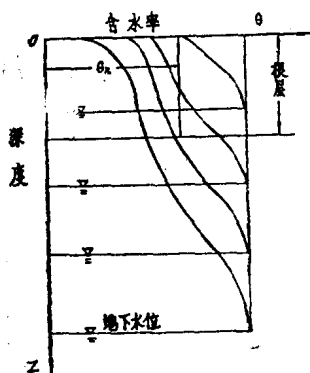


图-3 地下水位对作物根系吸水层含水率的影响

为了使根系层内土壤含水率保持在田间持水率以下，土壤的充气孔隙率能够满足气体交换的要求，需采取排水措施，以控制地下水位。在降雨或灌水持续时间较长或暗管间距较小的情况下，降雨入渗补给量与地下排水流量相等时，地下水达到稳定，地下水面以上也形成稳定含水率分布曲线。在

有入渗补给条件下地下水面以上土壤含水率高于无入渗补给时的土壤含水率。在相同地下水埋深的情况下，非降雨季节土壤蒸发和作物蒸腾与地下水侧向或顶托补给相等时，土壤剖面含水率也可以达到稳定，但在这种情况下土壤含水率低于无蒸发时的含水率，更低于有入渗补给时的含水率，如图-4所示。为了使根系层内土壤含水率保持在田间持水率以下，使土壤充气孔隙率达到 8~15% 的要求，在降雨期间地

下水位应低于干旱季节保持的地下水位。排灌两周的暗管系统，在干旱季节应将明沟和暗管水位适当抬高，以发挥浸润灌溉的作用。

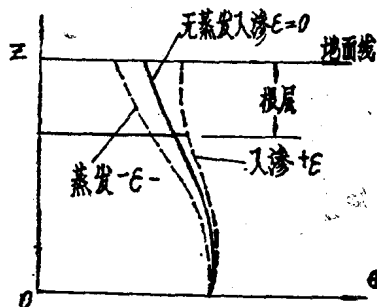


图-4

在降雨入渗强度较大，或排水暗管间距较大，降雨期间排水作用不显著时，可能引起地下水位迅速上升。雨停后，排水沟或暗管附近由于排水沟或管的作用，地下水位很快下降至与沟或暗管水位基本齐平的高度。根据数值模拟在雨后地下水位上升至地表的情况下，其土壤含水率分布在时间上的变化如图-5所示。雨停后由于地下水位的降低，土壤水分一部分向地下排除，另一部分则消耗于蒸发。初期排水强度与蒸发强度均发生最大值。随着时间的增长，排水强度逐渐减小，直至强度为零为止。表层土壤含水率也不断降低，在含水率降低至临界含水率以下时，蒸发强度也逐步减弱。如有地下水的侧向或顶托补给时，则蒸发的一部分将取自地下水。当蒸发与补给平衡时土壤含水率剖面达到稳定，如图-6所示。如缺乏地下水补给，则地下水位将因蒸发而下降。在排水沟或管的深度较小时，连续蒸发可能会使地下水位下降

至沟、管以下。

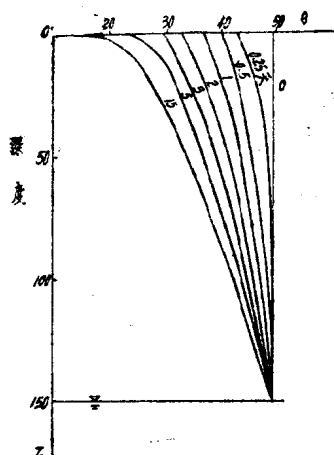


图-5

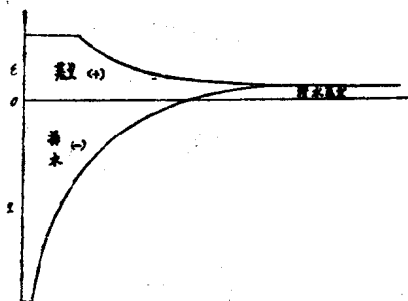


图-6

以上是两种极端情况，一般情况下，降雨时发生地下水位持续上升，但水位上升高度，因排水的作用受到一定限制。降雨和灌水入渗停止后，在排水和蒸发作用下地下水位逐步回落。地下水水面以上的土壤水分的变化而介于以上两种极端情况之间。降雨时入渗补给地下水，雨停一段时间（时间长短与降雨入渗水量、土壤质地和地下水埋深等因素有关）后补给停止，并开始蒸发消耗地下水。

综上所述，农田土壤水分状况与地下水动态有着十分密切的关系。通过控制地下水位可以调节农田土壤水分状况：在降雨入渗过程中排水可以减少地下水位上升，雨停后可以加速地下水位的回落，从而可以降低土壤的含水率，增强土壤的通气性。

地下水动态与农田盐分动态也有密切关系。降雨或灌水

时土壤的入渗能力和在蒸发条件下土壤向上的输水能力，在一定的土壤条件下都决定于地下水位的埋深。地下水埋深愈大，降雨时入渗水量愈小，蒸发时则向上补给的强度大，因而不利于土壤脱盐，但容易形成土壤积盐，通过排水系统降低地下水位是促进土壤脱盐和防止返盐的有效措施。

（三）农田排水的设计准则

农田排水的设计准则是排水设计的基本依据，直接影响到工程的投资与效益。虽然国内外在这方面进行了大量的工作，但目前有论证的确定设计准则仍然是一个薄弱的环节。各地采用的排水设计准则的指标有以下几种：

1. 以土壤含水率（或充气孔隙率）作为控制指标

农田土壤含水率或充气孔隙率是农田排水最直接的指标。它直接反映排水的效果，通气状况应当作为排水设计准则的主要指标。但目前在这方面的研究还远不能满足生产的需要。当前需要探索不同土壤，不同作物各生育阶段的允许的最高含水率（或最低充气孔隙率），超过这一含水率的允许的持续时间，以及高含水率与作物产量的关系等等。

2. 以地下水埋深作为控制指标

地下水埋深是目前应用最广的指标。各地对主要作物不同生长阶段所要求控制的水位已积累了不少资料，但由于试验条件所限，防渍地区对地下水埋深较大（例如，1.2~1.5米以上）时作物生长情况，产量水平还很少研究。特别是对于降雨过程中允许的地下水上升高度（或地下水埋深），持续时间及其对作物产量的影响，国内外都缺乏足够的研究。由于地下水动态指标是非稳定流排水设计的基本依据，标准的差异直接关系到工程的投资。例如，有些地区要求麦田地下水位在雨后三天内降低至0.5米；有的地区要求在两天内

下降至0.5米；有的地区要求在三天内下降至1.0米；还有的地区则要求在6天内下降至0.8~1.0米。对棉田的要求也相差很远，有的地区要求在两天内水位下降至1米，有的则允许在7~8天内下降至1米。不同标准所要求的管距和投资将有很大差距。为此，加强这方面的研究工作具有重要意义。

3. 以水田的入渗强度作为控制指标

虽然水稻具有较大的细胞孔隙，作物根系需要的氧气可以部分地通过这些空隙而输送。但在土质粘重，地下水位高，长期淹灌的稻田土壤中 O_2 仍常不足，容易产生硫化氢、氧化亚铁等有毒物质，影响作物生长发育。在这类地区需要通过排水增加稻田渗透，用入渗水中含有的氧气补充土壤中 O_2 的不足。为此，常将稻田的适宜渗透强度作为排水的控制指标。根据我国各地资料，稻田适宜渗透强度变化范围为8~20毫米/日，由于这一指标也直接影响排水规格和工程投资，因此，进一步探索水稻在不同生育阶段、不同土质条件下适当渗透量数值是十分必要的。

4. 以土壤脱盐和地下水淡化深度作为排水控制指标

在盐碱地改良地区，为了保证改良后的土地适于种植作物，在改良阶段（冲洗改良或种稻改良等），应使土壤脱盐至一定深度。土壤脱盐深度视作物品种耕作制度和田间管理水平而异。连续种植水稻的地区要求的脱盐深度较小（一般脱盐深度0.3~0.5米即可保证作物生长），种植旱作物地区则要求有较大的脱盐深度（在0.8~1.0米以上）。在管理阶段，为了保证土壤不致再度返盐，并有效地利用降雨和灌溉的水量，应使地下水淡化至一定的深度（有时达3~5米以上）。土壤脱盐和地下水淡化深度，决定于排水规格、灌溉冲洗技术和土壤质地。这一深度直接关系到灌溉冲洗的用水

量、排水工程的投资和水资源的合理利用。因此，研究适宜的土壤脱盐和地下水淡化深度指标也是北方盐碱地改良地区排水的重要课题。

5. 以根层土壤含盐量和排蒸比为排水控制指标

在有土壤盐碱化威胁地区，加速地下水位的回落，可以增加降雨和灌水的入渗量和地下水排水量，减少地表的蒸发量，因而可以减少地表盐分的积累，防止土壤盐碱化。根层（或表层）土壤的含盐量是直接反映土壤盐碱化程度的指标，用以作为排水设计的控制指标具有很大的优越性。但对排水条件下盐分运动的计算目前尚有一定困难。排蒸比即自地下排水系统排除的水量与自表层蒸发消耗的水量之比。这一比值反映了土壤脱盐和积盐的趋势。因此，可以间接地作为排水控制指标。排蒸比数值与土壤含盐量和地下水矿化度以及入渗水的水质等有关。在观测试验的基础上，我国水利水电科学院等单位给出了不同盐碱化程度地区的排蒸比经验数值。通过试验研究进一步验证、补充、修正这些数值，也是一项十分有意义的工作。

二、土壤水盐运动的基本概念和基本方程

土壤水分运动的研究一般有两种途径。一种是毛管理论，一种是扩散理论。前者把土壤看成是一条均匀或不同管径的毛管，将土壤水运动简化为水在毛管中的运动。毛管理论概念清楚易懂，五十年代以前应用比较广泛，目前仍有一定实际意义。但这种方法有一定局限性，仅适用于一些简单条件下的水量的分析，不能确定土壤的含水率。扩散理论则是根据在土壤水势的基础上推导出的扩散方程研究土壤水分运动。这种方法的理论比较严谨，可以适用于各种边界条

件。特别是随着电子计算机的发展和数值计算的应用，近三十年来利用势能理论（扩散理论）研究土壤水分运动已取得很大发展，对用于排水条件下土壤水分运动问题的研究有着广阔的前景。

（一）土壤水运动的基本方程

在一般情况下，达西定律同样适用于非饱和土壤水分运动，在水平和垂直方向的渗透速度 v_x 、 v_z 可分别写为：

$$v_x = -k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

$$v_z = -k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (2)$$

式中 $\varphi = h + z$ ——土壤水总势能（以总水头表示）；

h ——压力水头，在饱和土壤（地下水）的情况下为正值，在非饱和土壤中为负值；

k ——渗透系数（或称水力传导度，导水率），为含水率 θ 的函数 $k(\theta)$ ；或土壤压力水头（负压） h 的函数 $k(h)$ 。

例如：

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right)^{n'} \quad (3)$$

$$k(h) = \frac{a}{|h|^n + b} \quad (4)$$

或 $k(h) = k_s e^{c \cdot h} \quad (4')$

式中 k_s ——饱和含水率（ $\theta = \theta_s$ ）时的渗透系数；

n' ——经验指数， $n' = 3.5 \sim 4$ ；

n ——经验指数，变化于1.5~4之间，粘质土 $n = 1.5 \sim 2$ ，砂性土 $n = 3 \sim 4$ 。

设：土壤水在垂直平面上，发生二维运动，取微小体积 $dx \cdot dz \cdot 1$ （垂直于 xz 平面，厚度为 1），如图-7所示。

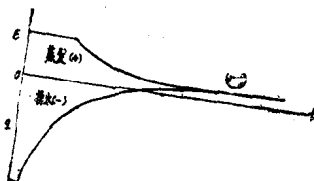


图 7

则 在 x 、 z 方向进入和流出此体积的差值为：

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dx \cdot dz \quad (5)$$

单位时间土壤体积中贮存量的变化率为：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} dx \cdot dz \quad (6)$$

式中 θ ——土壤体积含水率。

根据质量守恒的原则，(5)、(6)式应相等，从而可得到土壤水流连续方程式：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \quad (7)$$

将(1)、(2)中 v_x 、 v_z 代入水流连续方程式(7)，可得：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right]}{\partial z} + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (8)$$

考虑到 $\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$

并令 $D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta}$

代入(8)式得:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]}{\partial z} + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (9)$$

式中 $D(\theta)$ 称为扩散度, 表示单位含水率梯度下通过单位面积的土壤水流量, 其值为土壤含水率的函数。

由于土壤含水率与压力水头 h 之间存在着函数关系, 导水率 k 也可写成 $k(h)$ 的形式, (9) 式中

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t}$$

令 $\frac{\partial \theta}{\partial h} = c(h)$

则 (9) 式可写成:

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right]}{\partial z} + \frac{\partial k(h)}{\partial z} \quad (10)$$

(9)、(10) 式为土壤水运动基本方程的两种常用的形式。

$c(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 表示压力水头减小一个单位时, 自单位体积土壤中所能释放出来的水的体积, 其量纲为 $[L^{-1}]$ 。 $c(h)$