



# 中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—20××/ ISO 24120-1:2022

## 农业灌溉设备 承压灌溉系统实施指南 第1部分：灌溉通则

Agricultural irrigation equipment — Guideline on the implementation of  
pressurized irrigation systems—Part 1 :General principles of irrigation

(ISO 24120-1:2022, IDT)

(征求意见稿)

202×-××-××发布

202×-××-××实施

国家市场监督管理总局发布  
国家标准化管理委员会



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用 ISO 24120《农业灌溉设备 承压灌溉系统实施指南 第1部分：灌溉通则》。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国农业机械标准化技术委员会(SAC/TC201)归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：



# 农业灌溉设备 承压灌溉系统实施指南 第1部分：灌溉通则

## 1 范围

本文件提供了承压灌溉系统的实施指南。

本文件适用于在大田或封闭种植结构（如温室、连栋温室）进行的小规模家庭农业和大规模商业农业。

本文件供农业部、农学家、灌溉规划者、农民和最终用户使用。

## 2 规范性引用文件

本文件中没有规范性引用文件。

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**湿润锋** wetting front

入渗过程中土壤湿润区和干燥区的边界。

【来源：土壤学术语汇编，有修改】

## 4 用水管理

### 4.1 水土关系

#### 4.1.1 概述

土壤是一个三相系统（矿物质和有机固体颗粒、水和空气）。它是植物使用的水库。为设计灌溉系统，宜考虑第4章所述的土壤-水-植物关系。土壤物理参数值的示例见附录A。

#### 4.1.2 固体颗粒和孔隙率

土壤体积由不同大小的固体颗粒（沙子、淤泥和粘土）和孔隙组成。三组颗粒的相对含量决定了土壤质地。

未被固体颗粒填充的体积定义为土壤孔隙。孔隙的总体积和大小取决于土壤质地。土壤粘土含量越高，土壤的总孔隙度越高，孔径越小。总孔隙率在沙质土壤中为35%至40%，在中等土壤中为50%，粘土可达到60%。

在土壤水分饱和的条件下，土壤的所有孔隙都充满了水，因此不含空气。

#### 4.1.3 土壤水分

水相对于固体质量的百分比是水的质量与颗粒质量之间的关系【如式(1)所示】，通常通过重量法确定。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

式中：

$w$ ——重量含水率（%）；

$m_w$ ——水的质量（g）；

$m_s$ ——干土或固体的质量（g）。

重量法是测定土壤水分最准确的方法（即标准方法），它包括将土壤样品在 105 °C 的烘箱中干燥 24h（或直到样品达到稳定质量）。含水率（ $w$ ）能使用公式（2）获得：

$$w = \frac{m_{w+c} - m_{d+c}}{m_{d+c} - m_c} \times 100 \quad (2)$$

式中：

$m_c$ ——容器的皮重；

$m_{w+c}$ ——湿土+容器的重量；

$m_{d+c}$ ——干土+容器的重量。

水相对于土壤体积的百分比（即体积含水率）是水体积与土壤总体积之间的关系。见公式（3）。

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100 \quad (3)$$

式中：

$\theta$ ——体积含水率（%）；

$V_w$ ——水的体积（ $\text{cm}^3$ ）；

$V_t$ ——土壤总体积（ $\text{cm}^3$ ）。

重量法能用于测定土壤容重、重量含水率和体积含水率。为此，宜使用 Uhland 土壤采样器或其他类似设备收集未变形的土壤样品，以提取未变形的样品。土壤容按公式（4）计算，其中土壤的总体积等于容器的体积。假设水密度为常数，等于  $1 \text{ g cm}^{-3}$ ，体积含水率按公式（5）计算。

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \times \quad (4)$$

$$\theta = w \times \rho_b \quad (5)$$

式中：

$\theta$ ——体积含水率（%）；

$w$ ——重量含水率（%）；

$\rho_b$ ——土壤容重（ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）。

#### 4.1.4 测定土壤层中的水量

土壤层中的水量能用水深（mm）表示。见公式（6）。

$$h = \frac{\theta}{100} \times n \quad (6)$$

式中：

$h$ ——特定土壤层中的水深（mm）；

$\theta$ ——体积含水率（%）；

$n$ ——特定层的厚度（mm）。

注：

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ lm}^{-2} = 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

$$1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$$

#### 4.1.5 土壤保水层

为规划灌溉制度，在不知道其他土壤特征的情况下知道土壤中的水量不足以确定作物可用的水量。

保持在土壤孔隙中的水是与空气接触的水的表面张力以及水与土壤颗粒之间的接触角引起的。因此，土壤孔隙中的保持力（毛细作用）随着土壤孔隙直径的减小而增加。

每种土壤都有自己的特征保水曲线（水张力相对于水分的变化），根据其质地和结构决定其孔径分布。

根据保水曲线，能定义土壤中的三种水分状况。

——饱和：过度降雨或灌溉后，所有土壤孔隙都充满水分，立即开始向下排水，沙质土壤更快，在土壤中随着粘土含量增加而变慢。

——田间保水量（ $\theta_{FC}$ ）：饱和状态和排水已基本停止后 1 天至 3 天土壤中的含水率。

——枯萎点（ $\theta_{WP}$ ）：当水分通过蒸散从土壤中吸取（从植物和土壤中）时，水张力增加（高达 1.5 MPa），达到大多数植物无法再吸取水分和永久枯萎的值。

土壤的总有效水可以计算为田间持水量与永久枯萎点的含水率之差，以百分比表示。见公式（7）。

$$W_{TA} = \left( \frac{\theta_{FC} - \theta_{WP}}{100} \right) n \quad (7)$$

式中：

$W_{TA}$  ——特定土壤层中的总有效水（mm）；

$\theta_{FC}$  ——田间保水量时的体积含水率（%）；

$\theta_{WP}$  ——枯萎点的体积含水率（%）；

$N$  ——特定层的厚度（mm）。

#### 4.1.6 土壤水势和土壤中水的运动

土壤中的水受到多种力的影响，导致土壤水的势能不同于纯水和自由水的势能。这些力是由于水对土壤固体基质（粘土颗粒和有机物质）的吸引力，以及溶解盐的存在以及重力的影响。土壤中的总水势能可以表示为每个这些力的个体贡献的总和，如公式（8）所示。

$$\varphi_t = \varphi_g + \varphi_m + \varphi_o + \dots \quad (8)$$

式中：

$\varphi_t$  ——土壤中的总水势能；

$\varphi_g$  ——重力势能；

$\varphi_m$  ——基质势能；

$\varphi_o$  ——渗透势能；

… 理论上存在的土壤中的水的势能的其他项的表达式。

土壤中两点之间的水的运动方向取决于总水势（ $\varphi_t$ ）的差异。移动发生从最高势能点到较低势能点。在土壤中两点之间的水的运动中，渗透势能（ $\varphi_o$ ）可以忽略不计（在两点之间没有半透膜的情况下），因此总势能仅限于重力势能（ $\varphi_g$ ）与基质势能（ $\varphi_m$ ）之和（ $\varphi_t = \varphi_g + \varphi_m$ ）。

土壤中给定点的水的重力势能由土壤中该点的相对高度（例如，相对于地表）确定。

基质势能也称为毛细势能。它是由毛细作用（取决于土壤中孔隙的大小）和水吸附力（通过吸引固体土壤颗粒，尤其是粘土和有机物质）引起的。

#### 4.1.7 水分在土壤中的分布

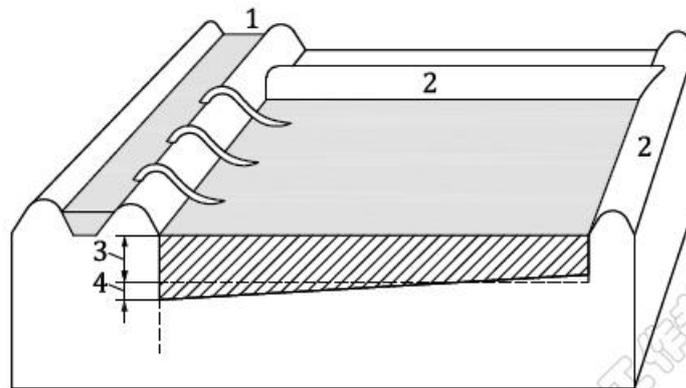
4.1.7.1 表面全润湿法

采用表面全润湿的灌溉方法（地表小区灌溉和一些喷灌）旨在使水在整个土壤表面均匀分布，类似于自然降雨。灌溉过程中土壤中水分运动的驱动力是重力（土壤表层和土壤深层之间土壤水分重力势能差）和润湿锋两侧土壤的基质势能差。

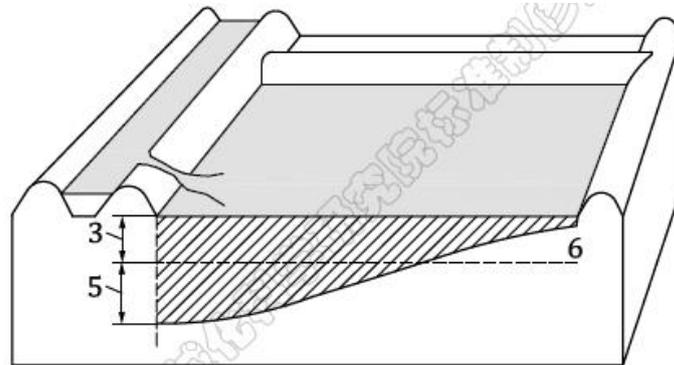
一般来说，润湿锋是一个平行于土壤表面前进的平面。当土壤水分存在差异，即土壤中同一深度的两点之间的基质势能存在差异时，就会发生水的水平运动。在采用表面全润湿的方法中，这种差异仅存在于灌溉区的边界内，其中湿区和干区之间的接触平面（区边界中的润湿锋）代表了与该区域表面和润湿锋在垂直方向上有关的非常小的区域。这就是为什么横向运动相对于垂直运动非常小，而水在水平方向上移动所湿润的体积相对于灌溉的土壤总体积来说是最小的。盆地的水流模式如图 1 所示，喷灌中的水流模式如图 2 所示。

在流域灌溉中，在理想的润湿模式下，靠近田间渠道的渗流损失很小，因此在另一端渗流深度较低。当流入量不足时，近渠处渗流高，向末端渗流深度低于最佳条件（见图 1）。

在喷灌中，通过建立来自相邻喷头的分布模式的充分重叠来获得土壤表面上的均匀水分布。重叠程度取决于单个喷头的特征分布模式，而后者又是喷头类型、喷头在作物上方的高度、喷嘴、压头和风力条件的函数。重叠度和均匀度还取决于移动速度以及百分比计时器是否使用 30s、60s、120s（或其他）设置。



a) 理想的润湿模式

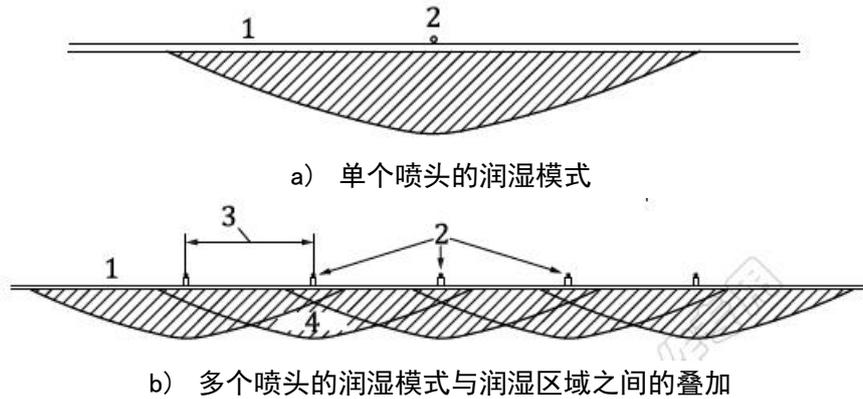


b) 流量不足的的润湿模式

标引序号说明：

1 田地渠道

- 2 管束
- 3 根区
- 4 低渗滤损失
- 5 高渗滤损失
- 6 过干

图 1 流域灌溉配水<sup>[1]</sup>

标引序号说明：

- 1 支管
- 2 喷头
- 3 间距
- 4 润湿区域

图 2 喷灌<sup>[1]</sup>

#### 4.1.7.2 部分表面润湿法

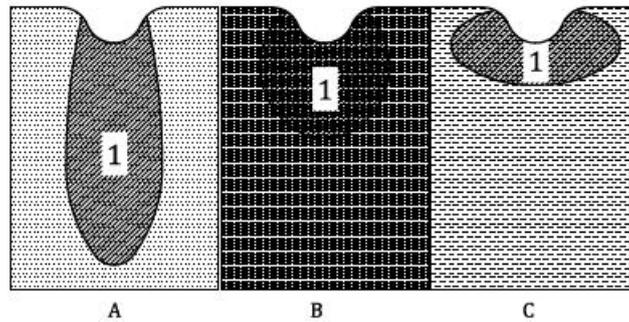
##### 4.1.7.2.1 一般要求

在部分土壤润湿的灌溉方法中（犁沟、滴灌、微喷灌和一些在移动设备上灌溉的情况，例如 LEPA-低能耗精密应用），由于水分在入渗过程中的作用力及其在土壤中运动的作用，由于水在渗透和在土壤中移动过程中作用于水的力，湿润区具有特殊的形状。水是通过土壤中水的总势能差而移动的【见公式（8）】。在垂直运动中，重力势能和基质势能的差异同样起作用。在水平运动中，仅存在基质势能的差异。

一般趋势是垂直运动（基质势能和重力势能之差）大于水平运动（仅基质势能之差的结果）。随着土壤中粘土含量的降低，两个运动方向之间的差异会更大。这是因为土壤湿润区和干燥区之间基质势能的差异在粘土含量较高时更大，而土壤之间的重力分量没有差异，无论其质地如何。

##### 4.1.7.2.2 沟灌

水在犁沟中流动并向下渗透到单个犁沟的侧面（见图 3）。



标引说明:

A 沙土

B 壤土

C 黏土

1 润湿区

图3 不同质地土壤中沟灌中的水分运动<sup>[1]</sup>

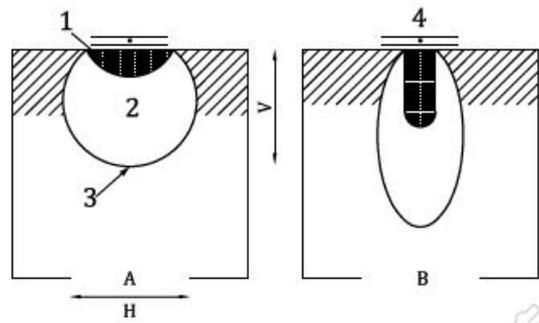
#### 4.1.7.2.3 滴灌

在滴头下方和周围，水滴一滴一滴地滴下，形成一个湿润的土壤区，在其中能划分为三个区域（图4）：

——饱和区：在滴头下方和周围形成一个饱和区，水从该饱和区流向土壤内部。在这个区域有多余的水和缺乏空气。特别是在中等或粘土质地的土壤中，地表有少量水积聚，水从那里渗入饱和区。

——平衡区：是一个中间区，水分含量接近田间保水量，因此水分和空气含量之间存在最佳比例。

——湿润锋：它是中间带和干燥带之间的分界线，或含水率与开始灌溉时的相似。在这个区域，湿度不足，土壤的通气量大。



标引说明:

A 黏土

B 沙土

H 水平尺寸

V 垂直尺寸

1 饱和区

2 平衡区

3 干区（湿润锋）

4 滴头

图4 两种不同质地土壤滴灌中的湿球

润湿区（湿球）的形状和尺寸取决于五个因素：

——土壤：当施加一定量的水时，与沙质土壤（具有高饱和导水率）相比，在粘土（饱和土壤中的导水率低）上形成的球茎会更浅、更宽。在沙质土壤中，垂直维度会更发达，而水平维度会变窄。

——滴头流量：对于给定的土壤，滴头流量的增加意味着饱和区半径的增加，即更宽和更浅的球茎。对于相同的滴头流量，土壤粘土含量越高，饱和区半径越大。

——灌溉持续时间：水平尺寸从灌溉开始就增加，只要持续灌溉，就会达到一定的限值，这也取决于土壤的质地和滴头流量。超过这个限值，灌溉水将主要在垂直方向流动，由于根区以下的排水造成的水损失，从而降低了灌溉效率。

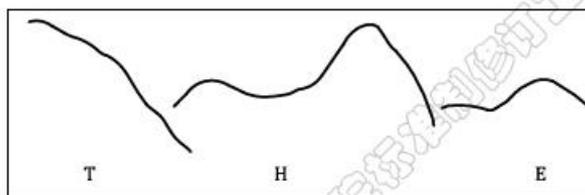
——灌溉频率：随着土壤含水率的减少，土壤中的水分张力增加。土壤的导水率对滴头润湿土壤中的水分的流动有广泛的影响。导水率随着土壤中水分张力的增加（含水率的下降）呈指数下降，水的流动变慢。在这些条件下，基质势能的相对重要性大于重力势能，导致灌溉水水平流动更加突出。

——球茎尺寸和滴头间距的计算：滴头间距是滴头之间沿横向线的间距（距离）。滴头之间的最佳距离是指在田间计算或估算的单个滴头润湿直径的80%。在这种间距下，相邻滴头的润湿区域之间会产生重叠。同时，沿着滴管侧面将产生一条湿带。

附录 B 中提供了一些估算湿润区域尺寸方法的示例。滴灌系统制造商根据经验，在其目录中提供了针对不同土壤和作物的推荐间距数据。

#### 4.1.7.2.4 微喷灌

与滴灌类似，这种灌溉方法对土壤的润湿是局部的。不同类型的微喷头在土壤表面形成不同的水量分布图形（见图 5）。因此，微喷灌土壤中水分的分布取决于地表的水分分布图形和微喷头分配的水分所达到的半径。土壤中的水分运动图形与点源（滴头）不同，与喷灌模式相似。在放置单个滴头的情况下，即种植园中的每棵树都有一个滴头，由于湿润区域和干燥区域之间的水势差异，水会向两侧移动（见图 6）。在许多情况下，滴头的位置使得相邻滴头的润湿区域之间存在重叠，并且沿着一排树木将有一个连续的润湿带。在这种情况下，水的横向运动将流向一排排树木之间的区域。



标引说明：

T 三角形

H 驼峰

E 偶数图

图 5 单个微喷头的水量分布示意图

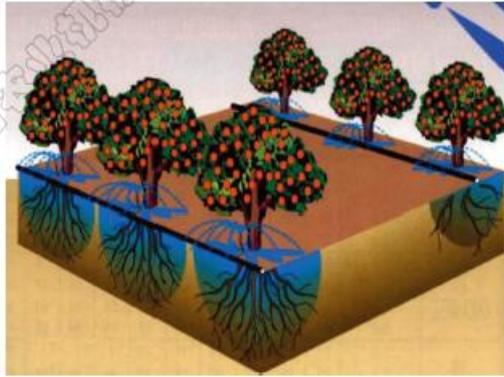


图 6 单个微喷头的湿润图形

#### 4.1.7.2.5 移动设备——中心支轴和直线——喷灌机组

在输送水的分配装置的下方和周围，形成了一个湿润的土壤区。其中可以区分三个区域：

——饱和区：紧挨着在施用装置的运动路径下方和运动方向上形成饱和区，水从该饱和区进入土壤。微喷灌的湿润土壤饱和区大于滴灌土壤。在这个区域有多余的水和缺乏空气。特别是在中等或粘土质地的土壤中，地表有少量积水，水从此处渗入饱和区。

——平衡区：是一个中间区，水分含量接近田间保水量，因此水分含量和空气含量之间存在最佳比例。

——湿润锋：它是中间区和干燥区之间的边界，或与开始灌溉时存在的含水率相似。在这个区域，湿度不足，土壤的通气量最大。

湿润区的形状和尺寸取决于五个因素：

——土壤：当施加一定量的水时，与沙质土壤（具有高饱和导水率）相比，在粘土（饱和土壤中的导水率低）上形成的球茎会更浅、更宽。在沙质土壤中，垂直维度会更发达，而水平维度会变窄。

——移动施水装置：对于给定的土壤，施水量的增加意味着饱和区宽度的增加。对于施水装置排放，土壤粘土含量越高，饱和带的宽度越大，可能导致水在施水装置前方移动。这将取决于移动施水装置的移动速度。

——灌溉持续时间：水平尺寸从灌溉开始就增加，只要持续灌溉，就会达到一定的限值，这也取决于土壤的质地和施水装置的运动。超过这个限值，灌溉水将主要在垂直方向流动，由于根区以下的排水造成的水损失，从而降低了灌溉效率。

——灌溉频率：随着土壤含水率的减少，土壤中的水分张力增加。土壤的导水率对施水装置润湿土壤中的水分的流动有广泛的影响。导水率随着土壤中水张力的增加（含水率的下降）呈指数下降，水的流动变慢。在这些条件下，基质势能的相对重要性大于重力势能，导致灌溉水水平流动更加突出。

——球茎尺寸的计算：间距是沿管道的施水装置之间的间距（距离）和管道的运动速度。管道沿线施水装置湿润区之间的距离取决于土壤和作物。运动是如何在运动的方向上获得重叠。

#### 4.1.8 灌溉量中盐分的分布

##### 4.1.8.1 概述

所有灌溉水源都含有溶解盐。浓度和成分取决于水源。当水分从土壤表面蒸发并通过作物蒸腾作用时，溶解盐积聚在根区。土壤盐分在宽度和深度上不均匀，而根系主要从盐分相对较低和水分相对较高的土壤体积中吸收水分和养分并发育。主根区体积由许多主要因素决定：

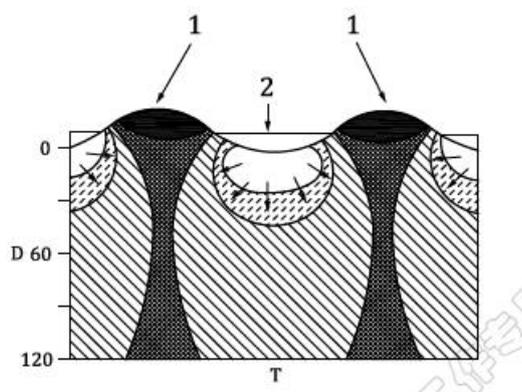
- 水中的盐含量；
- 灌溉管理；
- 施肥管理；
- 灌溉方法；
- 水分蒸发；
- 土壤类型；
- 雨水。

当根区的土壤浓度达到高于植物对最佳植物生长和产量的敏感性水平时，土壤就会被盐渍化。植物的这种敏感性在非常敏感到非常抵抗之间存在差异。

溶解盐随着水沿着土壤移动，盐的分布由土壤中的水流图形决定。盐在入渗水的湿润锋具有最大浓度。因此，土壤中盐分的分布与前面所述的水的分布相关。

#### 4.1.8.2 沟灌条件下的盐分分布

沟灌被认为是防止盐分积聚的一种很好的方法，因为大而深的渗漏可以将盐分从根区淋洗出去。但沟灌能促进沟边和两沟之间的垄沟处盐分的积聚（见图 7）。此外，盐分能在土壤剖面的湿润锋边缘积聚，即根区正上方。



图例：

D 深度，cm

T 土壤剖面中的总盐分

1 盐积聚带

2 沟里的水

	0.01-0.02
	0.02-0.1
	0.1-0.2
	0.2-0.5
	0.5-2.0

图 7 沟灌田土壤剖面盐分积累<sup>[4]</sup>

#### 4.1.8.3 喷灌条件下的盐分分布

在喷灌中，由于水被施加到所有的土壤表面并且向下流动，因此土壤中每个深度的盐浓度相对均匀。喷灌系统湿润整个土壤表面，形成的盐度随着土壤深度到根区底部而稳步增加（见图 8）。

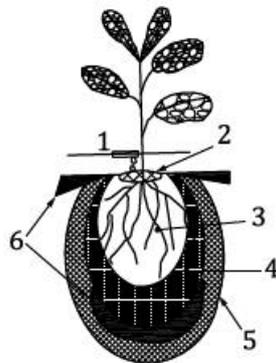


标引说明：  
 L 低盐度  
 H 高盐度

图 8 喷灌田土壤剖面盐分积聚

#### 4.1.8.4 滴灌条件下的盐分分布

在滴灌过程中，大量的盐分在湿润体积内运移。在经过几个灌溉周期、水分蒸发和盐分输送后，在湿润体、边缘和土壤中会产生土壤溶液盐分浓度的巨大差异（见图 9）。在积水区下，土壤盐分最低的是淋溶区。从这个区域到湿润区域的边界，盐的浓度逐渐增加。增幅在垂直方向最小，在水平方向最大。在湿润区的底部和顶部可以观察到非常高的盐度（因为水从土壤表面蒸发）。



标引序号说明：  
 1 滴头  
 2 积水区  
 3 淋溶区  
 4 积盐量  
 5 最高含盐量  
 6 极端高含盐量

图 9 单个滴头下的盐分布图形<sup>[6]</sup>

#### 4.1.8.5 微喷灌条件下的盐分分布

微喷灌湿润图中溶解盐的分布可能与喷灌不同。对于在每株植物周围喷洒一个相对较大的湿润区域的微喷灌系统，盐分可能以与单个喷头相同的图形积聚在每个区域内。相比之下，涌泉灌盐分往往主要积聚在湿润区的外边缘（见图 10）<sup>[7]</sup>。



标引说明:

A 微喷灌

B 涌泉灌

图 10 单个微喷头下的盐分布图形<sup>[7]</sup>

#### 4.1.9 盐浓度与土壤含水率的函数关系

土壤中盐分的积聚也发生在盐度相对较低的水源中。经过灌溉，以及随后的过量排水，土壤达到田间含水量。含水率高，因此盐的浓度相对较低。在两次灌溉操作之间，由于土壤表面的蒸发和植物的水分消耗，土壤含水率降低。这种含水率的降低意味着土壤中的盐分溶解在较少的水中，因此土壤溶液中盐分的浓度增加。因此，随着含水率的逐渐减少，盐的浓度逐渐增加。通过保持土壤中的高含水率可以减少盐分对作物的影响。做到这一点的方法是通过频繁灌溉，使土壤湿度保持在接近田间容量的值。

对于沟灌，只有每天进行灌溉，才能保持高含水率。这需要大量的水和能源投资，这是不切实际的。对于滴灌，日常应用是常见的做法。因此，滴灌系统可以降低盐分效应，可以在盐渍化土壤或与含盐灌溉水的情况下使用。其他灌溉方法在实际允许这种灌溉管理的同时，也可能存在频繁灌溉对盐分的影响。固定在地块上的微喷头可以进行日常灌溉，每天最多可以进行数次灌溉，例如滴灌。增加灌溉频率的喷灌和微喷灌的缺点之一是增加了灌溉期间蒸发或灌溉表面的水分损失。在盐碱条件下，溶淋积聚的盐分可以克服盐碱效应。然而，在非盐碱条件下，不一定需要高灌溉频率，所有灌溉系统都可用于成功种植作物。

#### 4.1.10 营养分布

养分在土壤中的分布，通过在土壤表面施肥和融入土壤剖面或通过施肥，土壤中养分的分布取决于营养元素和土壤成分之间的相互作用。

作为硝酸盐的氮具有移动性，在湿润区的分布与可溶性盐类似，用于各种灌溉方法，见 4.1.8。当施用含铵态氮的氮肥时，铵阳离子最初被吸附在粘土颗粒上，在土壤中的运动受到限制。铵态氮逐渐通过硝化过程，转化为硝酸盐，以可溶性盐的形式在土壤中移动。

土壤中磷的流动性是有限的。在碱性和中性土壤中，磷和钙和镁作为不溶性盐从土壤溶液中析出。在酸性土壤中，磷与铁和铝一起沉淀，并留在上层土壤中。

钾阳离子吸附在粘土矿物上，它们在粘土和中等质地土壤中移动受到限制。大多数施用的钾保留在上层土壤中<sup>[8]</sup>。

如果在土壤表面施用钾和磷，这些养分会留在土壤的上层，不会渗入根区，包括在下雨或喷灌后。只有在耕作之后，这些营养物质才会被纳入根区。滴灌和微喷灌不同，这些养分是通过施肥方式补充的，在根系内流动性更大，深度更深<sup>[9]</sup>。

与未吸附的离子相比，强烈吸附的养分在土壤中的流动性降低。对于给定的浓度，粘土的缓冲能力超过了沙土，因此，细质地土壤中吸附离子的迁移率低于粗质地土壤<sup>[9]</sup>。例如，在通过点源施用后，磷

浓度被限制在距离沙土和粘土土壤中的喷头分别为 12cm 和 7cm 的距离。通过滴灌施用的磷酸盐比通过喷灌施用于土壤表面时移动的距离要大得多。在点源施用磷时，所有的磷都施用于小表面积上，因此土壤吸附位点饱和，磷迁移更大。

同样，土壤吸附影响不同施水方式下土壤中钾的运动。

#### 4.1.11 根系分布

土壤中的水分施用方式和水分分布图影响根系和分布。每种植物都有一个源于生长条件的典型根系模式。根系可浅可深、密集、分枝或稀疏，与植物冠层的形状无关。与喷灌相比，频繁和少量的滴灌水应用导致根系浅而紧凑（见图 11）。另一方面，由于滴灌土壤的通气 and 营养得到改善，活性细根的密度明显高于喷灌下生长的根系密度（见图 11）<sup>[8]</sup> 然而，移动式喷水装置能通过改进输送时间和体积来克服固定喷水器的缺点。



来源：Netafim

图 11 滴灌根系（右）与喷灌根系（左）的对比

## 4.2 水源

### 4.2.1 水源

灌溉计划所需的水取自水源。最常见的灌溉水源包括河流、水库和湖泊以及地下水。在过去的几十年中，处理过的废水（TWW）的使用有所增加。一些国家对海水和淡化盐水的使用也是如此。灌溉水的质量与其源头有关。质量参数分为化学和物理。这些参数的影响可能是对土壤和作物以及过滤器和灌溉灌水器的潜在堵塞。

### 4.2.2 与灌溉用水的化学/生物质量相关的主要参数对土壤和作物的影响

- 盐度危害——总可溶性盐含量
- 钠危害——钠、钙和镁离子的相对比例（钠吸附率——SAR）
- 酸碱度
- 碱度——碳酸盐和碳酸氢盐
- 特定离子——氯离子、硫酸根离子、钠离子和硼离子
- 无机微污染物——重金属（主要在 TWW 中）
- 有机微污染物——药品和个人护理产品（以 TWW 计）
- 微生物病原体（TWW）。

### 4.2.3 与化学和物理相关的参数对过滤器和灌溉灌水器的影响

- 溶解度低的主要无机盐
- 硬度

- 悬浮固体
- 总溶解盐（TDS）
- 生物需氧量（BOD）
- 化学需氧量（COD）
- 铁、锰和细菌
- 硫化氢和硫酸盐还原菌。

### 4.3 配水管道网络：主管、副管、配水管

管道将水输送到整个灌溉系统，从泵到过滤器、阀门和分配装置。

所有管道和配件的尺寸都宜适当，以承受最大工作压力，并在没有过度的压力损失或增益的情况下输送水。

PVC 管道可用于整个系统或与泵的钢管结合使用。聚乙烯（PE）或柔性管可用于副管和配水管。或者，可以使用铝管。

宜考虑在正常地面操作条件下发生的膨胀和收缩（每种类型的管道受到不同程度的影响）。

根据使用的管道类型，管道通过焊接、胶或摩擦配件相互连接，并固定在支持它们的基础设施上。所有管道均宜妥善固定和锚固。

在灌溉设计中，管道尺寸是根据经济性、摩擦损失、水锤效应和冲洗问题来指定的，随着管道尺寸的增加，摩擦损失会减少（降低泵送成本）但初始成本会增加。

由于地形和属性边界，不规则的场地形状很常见。在规划阶段，宜注意适当确定场地形状变化的副管和配水管的尺寸。不规则形状场地的副管和配水管是根据主管和支管的实际流量设计的，而不是系统的“平均”流量。

如果使用滴头或微灌（最小建议值： $0.3 \text{ m s}^{-1}/1 \text{ ft s}^{-1}$ ），管道系统的设计不仅要允许正常灌溉所必需的流量，而且要允许足够的流量以获得适当的冲洗速度。

冲洗的设计目标可能导致选择的管道直径与正常运行的设计过程中选择的管道直径不同。这是因为在主管、副管或分配管的任何部分中达到所需冲洗速度所需的冲洗流量可能不同于常规操作的设计流量。

## 5 承压灌溉设计

### 5.1 概述

在设计新的灌溉系统时，宜考虑各种参数，以设计出最佳且耐用的系统。在系统设计开始之前，收集预先设计的数据是必不可少的步骤。预先设计的数据可分为多个类别。

### 5.2 数据收集

#### 5.2.1 土壤特性

深度、质地、结构、容重、饱和度、田间保水量、枯萎点、有无分层和入渗率。

#### 5.2.2 表面形貌

地形图。

#### 5.2.3 气候

最大日蒸发量、月平均气温和旺季的月降雨量。

#### 5.2.4 水源及水质

水源（河流、水坝、池塘、水井、处理过的废水）、供水时间、最大每小时流量、供水连接处的压

力、化学和物理参数。

### 5.2.5 作物特征（果园、大田作物、蔬菜）

作物每日总需水量和净需水量、轮作详细信息、生长季长度、行间距和行内株距、根区深度、作物高度、耐盐性和养分消耗曲线。

### 5.2.6 当地用水规定

每日、每周、每月或每年的总取水量可由当地法规控制。可能需要泵送许可证。

## 6 计算灌溉制度

### 6.1 概述

对于成功的灌溉设计，宜考虑施用于作物的水量和频率。具体而言，宜在灌溉间隔时间最短的用水高峰期满足作物的需水量<sup>[10]</sup>。

### 6.2 土壤——水库

#### 6.2.1 概述

土壤是水库，可以满足作物的需要。一旦通过灌溉或降雨达到田间容量，它就会被蒸散逐渐耗尽。当土壤水分达到预定的最低水平时，宜进行灌溉以补充水库。最低限度宜是作物在营养发育和生产中不受缺水影响的程度。为了量化这个水库的大小，宜采取几个步骤。

#### 6.2.2 作物根区可用水分的计算

——土壤总有效水量（TAW）【见公式（7）】定义为田间保水量（FC）和枯萎点（WP）的体积含水量之差，以土壤体积的百分比表示。这些值是土壤的特征。沙质土壤的有效水分低于粘土。

——根据该蓄水量，可计算确定深度处单位面积的水量【见公式（6）】。宜使用的深度是有效根区的深度。这是植物需要 80% 的水分的土壤深度，主要来自根系较密集的上部。生根深度取决于植物生理、土壤类型和可用水量（灌溉类型）<sup>[11]</sup>。该值是有效根区（AWER）的可用水量。

#### 6.2.3 允许亏损管理的计算

尽管根区设计的所有可用水都能被植物吸收，但在设计计算中不习惯使用该总值。原因有两个：(i) 从技术上讲，灌溉系统（来自泵站或管道或管网的每个地方）可能出现故障，这会暂时阻止灌溉并将土壤水分带到永久萎蔫的枯萎点，对作物造成损害；(ii) 从生理上讲，土壤水分水平需要保持在植物容易吸收的水平。这种允许的土壤有效水分不足或枯竭（MAD）是可被植物吸收的部分（没有任何导致减产的压力）<sup>[11]</sup>。该值取决于作物类型、根深、土壤、气候和灌溉方法。MAD 值在 20 % 和 70 % 之间变化。根据作物的不同，允许的亏缺可能会在生长季节发生变化，特别是一年生作物，其中一些作物在营养阶段可能会容忍较大的允许亏缺，而在生殖阶段则可能会容忍较低的亏缺。

#### 6.2.4 净灌溉深度（NID）

如果有效根区的可用水量（AWER）乘以允许的最大耗竭值（MAD），则可得出全表面润湿的灌溉方法（地表小区灌溉和喷灌）的净灌溉深度。在部分表面润湿的方法中（犁沟、滴灌、微喷头和移动式水应用装置，如 LEPA），灌溉面积的百分比（并且取决于此，润湿土壤的体积）取决于灌溉系统、灌水器位置、工作压力和每小时排放量。在滴灌中，根据滴头之间的距离和支管之间的距离来设置润湿面积，同时考虑到支管上相邻的两个滴头润湿区域之间的重叠，约为 20%。将净灌溉深度（NID）乘以灌溉面积百分比（ $P_a$ ），其值为 50 % 至 100%，得到校正的 NID。

#### 6.2.5 总灌溉深度（GID）

在灌溉过程中，蒸发、深层渗滤、径流、施用均匀度、风漂移等会导致大量水分流失。流失量取决于系统的效率。通过添加足够的水来填充根区的净灌溉深度（NID），可以补偿这些损失。计算 GID 时，NID 宜除以系统效率（%）除以 100。所得值不包括淋洗土壤中积累的盐分的要求。季节性灌溉效率的估计值列于表 1、表 2 和表 3。

表 1 季节性灌溉效率估计值（修改自<sup>[12]</sup>）

灌溉系统类型	效率范围（%）
表面	
犁沟（不重复使用径流水）	55-77
边界（不重复使用径流水）	63-84
盆地	70-80
精密水准仪	77-84

表 2 喷灌可达到的应用效率（应用效率低的季度，修改自<sup>[12]</sup>）

喷灌系统类型	效率范围（%）
手动移动，端拖侧滚（最高 w/备选集）	65-85
行枪、吊杆	60-65
中心支点，直线运动	75-90
固定式，侧移	70-80
LEPA	80-93
树下果园（非重叠）	80-93

表 3 季节性平均灌溉效率估计值

灌溉系统类型	效率范围（%）
滴灌	
得到补偿	74-93
未补偿	70-87

#### 6.2.6 浸出

根区可溶性盐的浓度会对植物的生长和产量水平产生负面影响。作物对盐分的敏感性各不相同，有非常敏感和非常抵抗的，其中有中等敏感性的。敏感性与土壤溶液中盐分的浓度有关，与灌溉水中的盐分含量相关，还受土壤类型及其水力特性、气候和灌溉系统的影响。如 4.1.8 所述，灌溉系统在土壤中盐分的分布不同。土壤中盐分的积累可以接受到一个限值（极限值）（附录 C 中给出了一些例子）。为避免达到此限值并降低浓度，宜使用过量的水（浸出部分），使其通过根区并在其下方渗出，并携带一部分积累的可溶性盐。该浸出部分宜在所有灌溉中使用或根据需要定期使用。在计算总灌溉深度（GID）时宜考虑浸出要求。

#### 6.3 作物需水量

从潮湿的土壤和植物表面蒸发的水量称为蒸发量（ET）。它的值很大程度上取决于气候因素。在总蒸发量中，土壤蒸发量约占 10%，植物蒸腾量占 90%。作物需水量包括用于蒸发蒸腾的总水量<sup>[1]</sup>。存在估算或测量蒸发量的替代方法。宜考虑作物因素（植物的生长阶段），以将计算或测量的自由水蒸发量或潜在 ET 转化为作物消耗的水量。出于系统设计和灌溉间隔计算的目的，使用植物的最大消耗时间。

#### 6.4 灌溉间隔

灌溉间隔是两次连续灌溉之间的天数。它是通过将净深度除以最大消耗期间作物的蒸发量来计算的。获得的数字可以是非整数，因此近似为较低的整数。在这种情况下，宜校正净深度值，该值将低于先前计算的值。

附录 A  
 (资料性)  
 土壤数据示例

土壤质地	沙	淤泥	黏土	孔隙率	土壤容重	场地容量 $\theta_{FC}$	枯萎点 $\theta_{WP}$	1 m 深度处的 总可用水量
	%			%	$g\ cm^{-3}$	%		$m^3\ Ha^{-1}$
沙	85-100	0-10	0-10	32-42	1.55-1.80	10-20	3-10	700-1000
砂质壤土	50-70	30-50	10-15	40-47	1.40-1.60	15-27	6-12	500-1500
壤土	40-50	30-50	10-30	43-49	1.34-1.50	26-37	11-17	1400-1900
粘土壤土	25-45	30-50	30-40	47-51	1.30-1.40	31-42	15-20	1700-2200
砂质粘土	45-65	0-25	35-55	49-53	1.25-1.35	35-45	17-22	1800-2300
粘土	0-45	0-40	55-100	51-55	1.20-1.30	39-49	19-24	2000-2500

## 附录 B

(资料性)

## 湿体积(球)尺寸的测定方法

## B.1 Shwartzman 和 Zur 方法

滴头在地表以下 30 cm 处沿水平面润湿的面积取决于滴头流量以及土壤中质地、结构、坡度和水平层的存在。开发了一个非常实用的模型来确定湿土的体积。该模型假设润湿体积取决于滴头流量、土壤的导水率以及施于土壤的水量。公式 (B.1) 和 (B.2) 允许计算湿区的宽度和深度<sup>[2]</sup>。

$$z' = K_1(V_w)^{0.63}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.45} \quad (\text{B.1})$$

$$w = K_2(V_w)^{0.22}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0.17} \quad (\text{B.2})$$

公式 (B.1) 和 (B.2) 可以组合在公式 (B.3) 中, 表示 w 和 z' 之间的关系:

$$w = K_3(z')^{0.35}(q)^{0.33}(K_s)^{-0.33} \quad (\text{B.3})$$

式中:

$z'$  到湿润锋的垂直距离 (m);

$w$  润湿区域的宽度或润湿区域的直径 (m);

$K_1$  经验系数, 29.2;

$V_w$  施水量 (l);

$K_s$  饱和导水率 (m/s);

$q$  滴头流量 (l/h);

$K_2$  经验系数, 0.031;

$K_3$  经验系数, 0.0094。

在公式 (B.3) 中, 知道给定作物的有效根区深度, 可以用它代替到润湿锋的垂直距离 ( $z'$ ), 并计算给定土壤的湿润区域宽度 ( $w$ )。通过这种方式, 可以确定相邻滴头之间的距离, 从而获得根区下方的最小排水量。示例: 使用表 B.1 中的数据, 可以计算润湿区域宽度的灵敏度, 该灵敏度将设置不同  $z'$  值 (润湿锋深度=根系深度) 下滴头之间的距离、滴头流量和土壤的水力特性。

表 B.1 示例计算值

滴头流量 ( $q$ ) (l/h)	饱和导水率 ( $K_s$ ) (m/s)	到润湿锋的垂直距离 ( $z'$ ) (m)
2	$2 \times 10^{-5}$	0.3
4	$2 \times 10^{-6}$	1

表 B.2 对表 B.1 中所有数据组合计算的示例结果

参数	单位	0.3				1			
		$2 \times 10^{-5}$		$2 \times 10^{-6}$		$2 \times 10^{-5}$		$2 \times 10^{-6}$	
$z'$	m								
$K_s$	$\text{m s}^{-1}$	$2 \times 10^{-5}$		$2 \times 10^{-6}$		$2 \times 10^{-5}$		$2 \times 10^{-6}$	
滴头流量	$\text{L h}^{-1}$	2	4	2	4	2	4	2	4
湿润区直径	m	0.28	0.35	0.59	0.74	0.42	0.53	0.90	1.13

从表 B.2 中给出的结果看出:

——对于每个根深, 饱和导水率越大 (土壤越轻), 加湿区域的宽度越小, 滴头之间所需的间距越小;

——对于每个饱和导水率, 滴头流量越大, 润湿区域的宽度越大;

——对于相同的土壤和滴头排放水力特性，根区深度越大，允许的水垂直运动越大，因此水平尺寸和滴头间距将更大。在相同的土壤中，在花卉种植园中，与根系更深的棉花种植园相比，需要使用更小的滴头间距。

## B.2 Hausenberg 方法<sup>[3]</sup>

Hausenberg 方法解释说，可以根据基本入渗量  $I$  (mm/h) 和滴头流量  $q$  (l/h) 的数据大致估计滴头润湿的直径。将  $I$  的单位从 mm/h 转换为  $l/m^2/h$ ，我们在公式 (B.4) 中得到：

$$I(\text{mm/h}) = I(l/m^2/h) = \frac{q(l/h)}{A(m^2)} \quad (\text{B.4})$$

式中：

$I$  渗透率 (mm/h) 或 ( $l/m^2/h$ )；

$q$  滴头流量 (l/h)；

$A$  滴头湿润的湿球面积 ( $m^2$ )。

面积  $A = \pi r^2 = 1/4 \pi d^2 = 0.785 d^2$  可以带入公式 (B.4)，得到公式 (B.5)：

$$I(l/m^2/h) \cong \frac{q(l/h)}{0.785 d^2(m^2)} \quad (\text{B.5})$$

由公式 (B.6) 推导出直径  $d$ ：

$$d(m) \cong \sqrt{\frac{q(l/h)}{0.785 I(l/m^2/h)}} \quad (\text{B.6})$$

要使用上述公式确定湿润土壤区域的尺寸，有必要了解土壤水力特性的常数和数据（水力饱和电导率或入渗率）。这些数据并不总是可用的。有可能使用来自类似质地土壤的数据。在这种情况下，湿润区域的尺寸值只是近似值，但它们可以用作灌溉系统规划的第一个近似值。有可能通过执行简单的现场测试来获得润湿区域的尺寸。这可以通过在具有代表性的地块的不同位置操作滴头并测量湿润区域的宽度和深度来完成。所使用的滴头可以连接到具有足够压力的灌溉系统，或者可以使用连接到位于地表以上一定高度的蓄水池的盆式滴头。由于这种方式无法获得滴头的标称压力或自调节滴头的最小压力，宜使用高流量滴头（10 l/h 或类似），其在获得的压力下，将有 2 l/h 至 4 l/h 的流量。在任何情况下，宜在试验条件下验证滴头的实际流量。浇水量宜与该地区作物最大消耗时的浇水量相似。如果测试开始时的土壤非常干燥，建议在采集土壤样本并确定湿润区域的尺寸之前连续两三天重复测试。建议至少挖掘 30 cm 至 45 cm 深以观察润湿直径<sup>[2]</sup>。

附录 C  
(资料性)  
选定作物的耐盐性

见参考文献[15]。

作物	阈值 (dS m <sup>-1</sup> )	斜率 (%每 dS m <sup>-1</sup> )
大麦	8.0	5.0
棉花	7.7	5.2
玉米	1.7	12.0
花生	3.2	29.0
高粱	6.8	16.0
大豆	5.0	20.0
紫花苜蓿	2.0	7.3
大麦	6.0	7.1
百慕草	6.9	6.4
黑麦草	5.6	7.6
小麦	4.5	2.6
芦笋	4.1	2.0
卷心菜	1.8	9.7
胡萝卜	1.0	14.0
黄瓜	2.5	13.0
茄子	1.1	6.9
生菜	1.3	13.0
胡椒	1.5	14.0
番茄	2.5	9.9
杏仁	1.5	19.0
杏	1.6	24.0
海枣	4.0	3.6
西柚	1.8	16.0
橙子	1.7	16.0
桃	1.7	21.0
李子	1.5	18.0

参考文献

- [1] FAO, Irrigation Water Management: Irrigation Methods. C. Brouwer. FAO Land and Water Development Division, 1985
- [2] Keller J., Bliesner R.D., Sprinkle and Trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
- [3] Hausenberg I., Soil-Water-Plant relationships. Extension Service. Irrigation Field Service. Israel Ministry of Agriculture, 1987
- [4] FAO, 1988. Salt-Affected Soils and their Management. I.P. Abrol, J.S.P. Yadav and F.I. Massoud. FAO Soils Bulletin 39.
- [5] Hanson B., Salt distribution under sprinkler irrigation. In: Agricultural Salinity and Drainage, (Hanson B., Grattan S.P., Fulton A., eds.). 1993, pp. 55–6.
- [6] Kremmer S., Kennig E., Principles of drip irrigation. Irrigation and Soil Field Service, Extension Service, Ministry of Agriculture, Israel, 1996 [(in Hebrew)]
- [7] Water Reuse Foundation. 2007. Effect of irrigation application method on salinity of soil water. Salinity Management Guide. [http:// www .salinitymanagement .org/ Salinity %20Management %20Guide/ about .html](http://www.salinitymanagement.org/Salinity%20Management%20Guide/about.html)
- [8] Sne M., Micro Irrigation in Arid and Semi-arid regions. Guidelines for Planning and Design. International Commission on Irrigation and Drainage. ICID, New Delhi, India, 2006
- [9] Bar-Yosef B., Advances in Fertigation. Adv. Agron. 1999, 65 pp. 1–77
- [10] Benami A., Ofen A., Irrigation Engineering. Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices. Agripo, Kfar Galim, Israel, 1993
- [11] Phocaides A., Handbook on Pressurized Irrigation Techniques. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Second Edition, 2007
- [12] Hoffman G.J., Howell T.A., Solomon K.H., 1990. Management of Farm Irrigation Systems. Chapter 6: Irrigation Efficiency and Uniformity. ASAE Monograph. The American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI.
- [13] Burt C. M., Clemmens A. J., Bliesner R., Merriam J. L., Hardy L., Selection of Irrigation Methods for Agriculture. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2000. [https:// doi .org/ 10 .1061/ 9780784404621](https://doi.org/10.1061/9780784404621).
- [14] Glossary of Soil Science terms. 1975. Soil Science Society of America, 34p. Madison, Wisconsin

[15] Maas, E.V. 1996. Crop Salt Tolerance. Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 71, 262-304, American Society of Civil Engineers