

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.024

# 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究\*

孙三民<sup>1</sup> 安巧霞<sup>1</sup> 蔡焕杰<sup>2</sup> 姚宝林<sup>1</sup> 乔英<sup>3</sup>

(1. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 阿克苏市财政局, 阿克苏 843000)

**摘要:** 通过小区试验研究了间接地下滴灌条件下密植枣树根区不同方向(水平及垂直方向)、不同土层盐分质量比的变化特征, 及导水装置直径(50、75、90 mm)和灌水量(9、13、17 L/(棵·次))对枣树根区土壤盐分运移的影响。结果表明: 经过一段时间后, 垂直方向 10~40 cm 土层盐分质量比较低, 0~10 cm 土层盐分质量比最高; 水平方向 10~50 cm 各土层盐分质量比随与出水口水平距离的增加而增大。在单次灌水后导水装置直径一定时各土层脱盐率随灌水量的增加而增大。当灌水量一定时, 10~40 cm 土层脱盐率随导水装置直径的增加呈减小的趋势, 0~10 cm、40~50 cm 脱盐率随导水装置直径增大呈低-高-低的趋势。在 7—9 月份, 当导水装置直径为 75 mm, 灌水量为 13、17 L/(棵·次)时, 0~50 cm 土层土壤平均盐分质量比均较低而且变化幅度较小。综合考虑节水、抑盐效果, 确定导水装置直径为 75 mm, 灌水量为 13 L/(棵·次)为适宜的间接地下滴灌灌溉模式。

**关键词:** 枣树 土壤 间接地下滴灌 盐分运移

中图分类号: S279.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)01-0160-10

## Research on Salt Movement Law in Jujube Root Zone under Indirect Subsurface Drip Irrigation

Sun Sanmin<sup>1</sup> An Qiaoxia<sup>1</sup> Cai Huanjie<sup>2</sup> Yao Baolin<sup>1</sup> Qiao Ying<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

3. Akesu Finance Bureau, Akesu 843000, China)

**Abstract:** In order to study transport and distribution characteristics of soil salinity under indirect subsurface drip irrigation, a field experiment was designed to analyze salt distribution characteristics and the effect of water-conducting device diameter (50, 75, 90 mm) and irrigation quantity (9, 13, 17 L/plant per time) on salt transportation in jujube root zone under indirect subsurface drip irrigation. The results showed that soil salt content of 10~40 cm soil layer was relatively low, and soil salt content of 0~10 cm soil layer was the highest in vertical direction, while soil salt content of each soil layer showed an increasing trend with the increase of distance from the outlet in horizontal direction under treatments after a period of time. After a single irrigation, desalination rate of each soil layer increased with the increase of irrigation quantity under a certain water-conducting device diameter. Desalination rate decreased with the increase of water-conducting device diameter in 10~40 cm soil layer under a certain irrigation quantity, while desalination rates in 0~10 cm and 40~50 cm soil layer had a trend of “low-high-low” with the increase of water-conducting device diameter. Soil salt content in 0~50 cm soil layer was relatively low when water-conducting device diameter was 75mm, irrigation quantity was respectively 13 and 17 L/plant from July to September, while soil salt content varied little. As a result,

收稿日期: 2014-06-27 修回日期: 2014-08-02

\* 国家自然科学基金资助项目(51069013, 51369028)

作者简介: 孙三民, 副教授, 主要从事农业节水灌溉技术与理论研究, E-mail: ssmqx@126.com

通讯作者: 蔡焕杰, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源高效利用研究, E-mail: huanjie@tom.com

water-conducting device diameter was 75 mm, and irrigation quantity was 13 L/pant, which was the suitable treatment that determined with consideration of the factors of water-saving and restraining salt. The research results had a theoretical support for the water-salt regulation and reasonable irrigation schedule in jujube field in southern Xinjiang.

**Key words:** Jujube Soil Indirect subsurface drip irrigation Salt movement

## 引言

南疆属极端干旱地区,除水资源缺乏是该地区农业发展的主要障碍因子<sup>[1-3]</sup>外,大面积耕地还存在盐渍化和次生盐渍化问题。据统计,新疆绿洲已开垦荒地  $3.333 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 现已有 40% ~ 50% 的耕地因次生盐渍化危害而弃耕,农业耕地土壤盐渍化面积达  $1.229 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 土壤盐渍化已成为绿洲农业生产发展的另一主要障碍因子<sup>[4-7]</sup>。南疆特色林果业的发展为当地经济和生态环境起到双赢作用<sup>[8-9]</sup>, 并成为农村经济的支柱产业。但随着南疆特色矮化密植果树的规模化和产业化,水资源短缺、土壤次生盐渍化严重等问题已成为其发展的瓶颈。如何确定适合当地枣树的节水灌溉技术,使之更好地起到节水、抑盐的作用是值得研究的课题。

间接地下滴灌是一种新型的高效节水灌溉技术,其特点是将水分直接输送至作物根系主要生长的深层土壤,使水分向上运移的湿润锋不能到达地表,地表的土壤保持相对干燥,从而减少了土壤表面无效水分的蒸发,达到水分高效利用和节约水资源的目的,适合稀植作物的灌溉<sup>[10]</sup>。

间接地下滴灌起源于 1997 年 Meshkat 等<sup>[11-13]</sup>提出的砂管灌(Sand tube irrigation, STI),国内学者对间接地下滴灌条件下的水分运移、导水装置规格模型等方面进行了一些研究,如赵伟霞等<sup>[10,14-15]</sup>通过室内试验研究了间接地下滴灌水分运移过程中的土壤湿润体特征参数,并根据水量平衡原理为间接地下滴灌建立了导水装置规格(直径、高度)参数模型;谢恒星等<sup>[16]</sup>研究了间接地下滴灌条件下不同供水下限对甜瓜植株性状、品质和产量的影响,确定出

最佳的供水模式、适宜的灌水装置规格,并发现通过间接地下滴灌能有效地提高作物品质 and 水分利用效率。间接地下滴灌条件下土壤水分的运动属于三维入渗运动,土壤中的盐分随水分一起运动,其独特的水分运移特点必然会对土壤盐分的分布特征产生影响。湿润体的特征影响土壤盐分的运移和分布<sup>[17-19]</sup>,灌水量和导水装置直径是影响湿润体特征的主要因素<sup>[15,20]</sup>,所以间接地下滴灌条件下灌水量和导水装置直径会影响土壤盐分的运移,但目前对此方面的研究鲜见报道。本文采用小区试验,研究间接地下滴灌及普通地表滴灌条件下密植枣树根区土壤盐分分布特征,及灌水量和导水装置直径对土壤盐分运移及分布的影响,旨在为南疆枣田选择合理的节水灌溉技术及土壤水、盐调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2011 年 5—9 月在新疆阿拉尔市塔里木大学水利与建筑工程学院灌溉试验站进行。该站年均日照时数达 2 865 h,年均气温 10.7℃,大于等于 10℃ 积温为 4 113℃,无霜期达 220 d,多年平均降水量为 67 mm,多年平均蒸发量 2 110 mm。试验地地下水埋深 2 m 左右,其土壤理化性状如表 1 所示。红枣种植品种为当地普遍栽培的骏枣,树龄为 4 a,种植方式为矮化密植。

### 1.2 试验设计

试验设 3 个导水装置直径,分别为 50 mm ( $D_1$ )、75 mm ( $D_2$ )、90 mm ( $D_3$ ),直径设置根据透水边界大小,防止灌溉时外溢及影响作物的根系生长等综合

表 1 试验地土壤理化性状

Tab. 1 Physical and chemical properties of experimental soil

土层深度/cm	土壤质地	土壤饱和含水率/(g·g <sup>-1</sup> )	田间持水量/(g·g <sup>-1</sup> )	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH 值	土壤盐分质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )
0~10	砂壤土	28.37	19.43	1.38	8.18	1.9
10~20	砂壤土	28.39	19.18	1.39	8.19	1.7
20~30	砂壤土	27.68	19.22	1.40	8.25	1.4
30~40	粘土夹层	30.46	26.43	1.43	8.43	1.5
40~50	砂土	27.87	24.15	1.42	8.24	1.3

确定;3个灌水水平,分别为9 L/(棵·次)( $W_1$ )、13 L/(棵·次)( $W_2$ )、17 L/(棵·次)( $W_3$ ),灌水量设置依据密植枣树在地表滴灌条件下的灌水定额<sup>[21]</sup>,同时考虑间接地下滴灌为根区灌溉,减少了棵间及地表土壤蒸发,提高水分利用率而初步确定。由于本地年降雨量小,本试验不考虑降雨对

灌溉量的影响。普通地表灌为对照,设3个灌溉水平同上,分别用 $CK_1$ 、 $CK_2$ 、 $CK_3$ 表示。试验共12个处理,滴头流量均为3 L/h,具体试验方案如表2所示。为防止各小区试验互相干扰,小区之间留有2~3 m的间距,尽量消除试验过程中时间和空间的变异性。

表2 试验方案

Tab.2 Pilot program

处理号	$D_1W_1$	$D_1W_2$	$D_1W_3$	$D_2W_1$	$D_2W_2$	$D_2W_3$	$D_3W_1$	$D_3W_2$	$D_3W_3$	$CK_1$	$CK_2$	$CK_3$
导水装置直径 $D/mm$	50	50	50	75	75	75	90	90	90	地表滴灌	地表滴灌	地表滴灌
灌水量 $W/(L \cdot 棵^{-1} \cdot 次^{-1})$	9	13	17	9	13	17	9	13	17	9	13	17

选取呈直线排列、株距为1 m的6棵枣树划分为一个试验小区。在实施间接地下滴灌的试验小区中,每棵树设置2个导水装置,布置在树干之间的连线上,距树干水平距离各200 mm处。滴灌管(管径16 mm,壁厚0.9 mm)距离树干100 mm,采用一管一行式布置,枣树种植与导水装置布置如图1所示。在实施地表滴灌对照试验的小区中,滴灌管布置方式同间接地下滴灌的试验小区,距树干水平距离各200 mm处设出水孔。为保证枣树的正常生长,枣树萌芽期和花期前期,统一采用漫灌形式灌水,灌水定额1 200  $m^3/hm^2$ 。从6月10日开始,各试验小区按照试验方案进行,6月10日—9月18日共灌水10次,

总灌水量为90~170 L/棵,灌溉制度如表3所示。

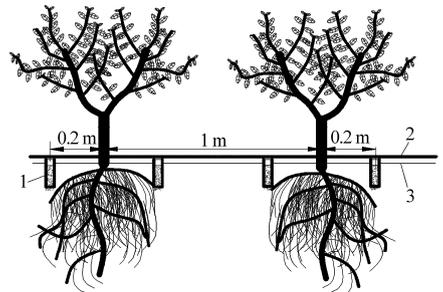


图1 枣树种植与导水装置布置

Fig.1 Diagrams of cultivate pattern of jujube and water-conducting device

1. 导水装置 2. 滴灌管 3. 地面

表3 灌溉制度

Tab.3 Irrigation schedule

L/(棵·次)

处理	阶段灌水定额										灌溉定额
	花期		初果期		果实膨大初期			果实膨大后期~成熟初期		果实成熟后期	
	(05-22-06-26)		(06-27-07-18)		(07-19-08-20)			(08-21-09-05)		(09-06-10-15)	
	06-10	06-24	07-06	07-14	07-23	07-31	08-09	08-23	09-05	09-19	
$D_1W_1, D_2W_1, D_3W_1, CK_1$	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	90
$D_1W_2, D_2W_2, D_3W_2, CK_2$	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	130
$D_1W_3, D_2W_3, D_3W_3, CK_3$	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	170

### 1.3 导水装置灌水原理及安装

导水装置灌水原理如图2所示,水由滴灌管经带有调节阀的小管滴入导水装置。导水装置内填充粗砂,其由上部分不透水边界(PVC管)、下部分透水边界(粗砂)和透水底部(粗砂)构成,水通过导水装置中粗砂到达透水边界和透水底部入渗进入根区土壤。安装时用不同管径取土器钻孔取土,土洞直径略大于布设导水装置直径,深度为25 cm(根据根系在垂直方向的分布确定<sup>[22]</sup>),将设计直径分别为50、75、90 mm,长30 cm的PVC管插入土洞底部,砂石过2~5 mm土筛,用尼龙网包裹厚度为15 cm的砂石置入PVC管底(方便日后取出),踩实土壤将

PVC管向上拔出5 cm,形成5 cm厚的透水边界,最后布置滴灌管,在靠近导水装置的滴灌管上安装出流小管,将水导入导水装置,用调节阀控制流量。

### 1.4 田间管理

试验小区安装微型滴灌砂石过滤器和微型施肥罐。采用枣树专用滴灌肥,每次施肥75  $kg/hm^2$ ,全生育期施6次,春季施基肥,其他农业管理措施同一般大田枣园。地面铺设辅管和毛管,一根毛管控制一个试验小区,每个毛管上的阀门和水表单独控制小区灌水量。

### 1.5 观测项目及方法

取样时间:灌水前及灌水24 h后。取样位置:

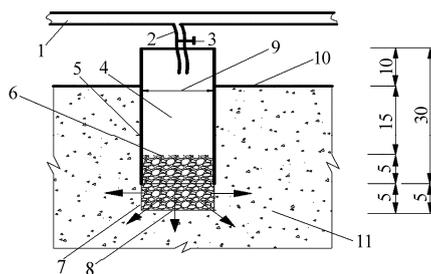


图 2 间接地下滴灌灌水原理示意图

Fig. 2 Diagram of indirect subsurface drip irrigation irrigator

1. 滴灌管 2. 小管 3. 调节阀 4. 导水装置 5. 导水装置不透水边界 6. 粗砂 7. 导水装置透水边界 8. 透水底部 9. 导水装置直径 10. 地面 11. 根区土壤

在间接地下滴灌试验中,以导水装置为中心,垂直于滴灌管径向方向,距离导水装置水平距离分别为 10、20、30 cm 剖面处取土(分别称为 A、B、C 剖面),各剖面取土深度为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm;在对照试验地表滴灌中,以靠近树干的滴头下方地表为中心,垂直于滴灌管径向方向,距离滴头水平距离分别为 10、20、30 cm 处取土,取土深度同上。取土时每个小区选取 3 棵树同时取土作为重复,分析结果取其平均值。所取的土样带回实验室进行测试分析,采用 DDS-302 型电导率仪(上海雷磁电导率仪厂生产)测量土壤电导率(1:5 土水质量比浸提液测电导率法)。

## 1.6 数据处理

土壤盐分质量比与土壤电导率间换算<sup>[23]</sup>为

$$y = 3.63x + 0.108 \quad (1)$$

式中  $x$ ——1:5 土水质量比浸提液电导率, mS/cm

$y$ ——土壤盐分质量比, g/kg

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同方向不同土层盐分质量比的变化特征

#### 2.1.1 垂直方向

间接地下滴灌中,水分通过导水装置透水边界和底部渗入土体,当靠近透水边界和底部的土壤水分接近饱和时,水分则缓缓向土壤四周扩散,形成一个类似椭球体的湿润体(即湿润锋)<sup>[24]</sup>,在垂直方向水分呈向上和向下 2 个方向运动,土壤中的盐分亦随水移动而被淋洗到上、下湿润体外缘,使靠近导水装置出水口土层盐分得到有效淋洗,起到“驱盐”的作用。地表滴灌中,水分从地表进入土体,下行水滴使滴头下方土壤水分接近饱和状态,然后缓缓向四周扩散,土壤中的盐分随水移动而被淋洗到湿润体外缘,从而使地表的土壤盐分得到有效淋洗<sup>[4, 25]</sup>。

图 3 为经过一段时间的试验处理后,间接地下滴灌及对照地表滴灌条件下各处理在 0~50 cm 各土层盐分质量比的变化特征,图中数据为 2011 年 8 月 1 日的土样盐分质量比,各层土壤盐分质量比为 A、B、C 三剖面均值。可以看出 2 种滴灌方式下 0~50 cm 各土层盐分质量比的变化特征不同,间接地下滴灌中各处理在 20~30 cm 土层盐分质量比最低。这是因为在试验中,间接地下滴灌导水装置埋深 20 cm,水分在地表以下 20~25 cm 深度范围进入土体,使靠近出水口的 20~30 cm 土层土壤保持较高的湿度,进而使该土层盐分质量比降低。随着与出水口垂直距离的增大,水分扩散速度逐渐减慢,水分对盐分的淋洗效果也逐渐减弱,使土层 30~40、40~50、10~20、0~10 cm 的盐分质量比分别依次增加,以表层 0~10 cm 土壤盐分质量比最高(图 3a)。

导致表层土壤盐分质量比高的主要原因是生育期内当地气温较高,土壤蒸发强烈,盐分在地表聚集,灌水前土壤表层盐分背景值较其他土层大,同时由于重力势作用,降低了水分向上的扩散速度,使水分对表层土壤盐分的淋洗效果减弱,致使土层 0~10 cm 盐分质量比高于其他土层。对照地表滴灌中,0~10 cm 土层盐分质量比较低(图 3b),随着土层深度的增加,水分对盐分淋洗效果逐渐减弱,土壤盐分逐渐增加,处理 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub> 在 30~40 cm 土层盐分质量比最高,而处理 CK<sub>3</sub> 在 40~50 cm 土层盐分质量比最高,这可能与不同灌水量对盐分淋洗深度不同有关。从以上结果看出间接地下滴灌条件下 10~40 cm 土层盐分质量比相对较低,而地表滴灌以 0~20 cm 土层盐分质量比相对较低。密植枣树的根系主要分布于 10~40 cm 土层<sup>[22]</sup>,所以相对于地表滴灌,间接地下滴灌能使密植枣树的主要根系处于相对低盐环境,有助于密植枣树的生长。

需要说明的是,在本试验期间虽然有 4 次降雨,但降雨量较小(5~9 mm/次),水分入渗深度仅在 0~10 cm 土层范围内,所以降雨对地表 0~10 cm 土层内盐分运移有一定影响,而对 0~10 cm 土层平均盐分质量比及垂直方向各土层盐分质量比变化特征的影响较小,所以在分析不同灌水方式下垂直方向不同土层盐分质量比的变化特征时忽略降雨,只考虑灌溉对其变化特征的影响。

#### 2.1.2 水平方向

间接地下滴灌条件下水分在地表下 20~25 cm 深度进入土体并使周围土壤达到饱和,水分在水平方向也缓缓向四周扩散,使土壤盐分质量比在水平方向亦有所不同。各土层水平方向盐分质量比的变

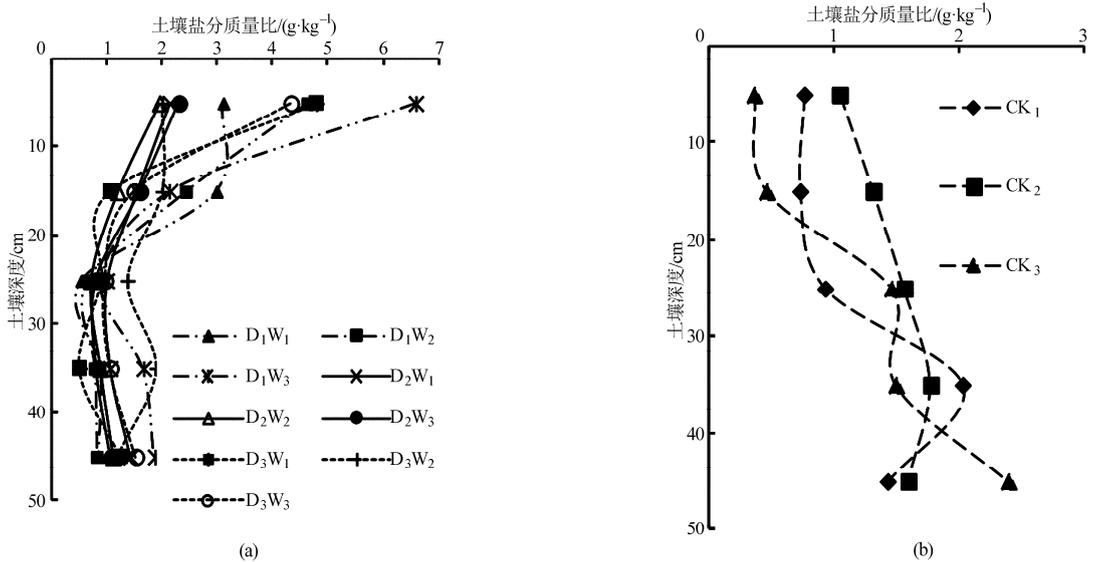


图3 2种滴灌方式下垂直方向0~50 cm土层深度盐分质量比

Fig. 3 Salt accumulation changes in different soil layers of 0~50 cm in vertical direction in both drip irrigations

(a) 间接地下滴灌 (b) 地表滴灌

化特征如图4所示,可以看出,在10~50 cm各土层中,不同处理基本呈现A剖面土壤盐分质量比最低,随着与出水口水平距离的增大,盐分随水分扩散速度减慢而逐步积累在土壤之中,使10~50 cm各土层盐分质量比呈现随着与出水口水平距离的增加而增大的趋势,所以10~50 cm各土层盐分质量比在B、C剖面逐渐增加。而在0~10 cm土层中,不同处理在水平方向盐分的分布基本呈现不规则状态,其可能的原因是,随着与出水口距离的增加,盐分逐步累积,使靠近湿润体边缘的土壤盐分质量比较大。地表0~10 cm土层接近于向上的湿润锋边缘,而不同处理在地表形成的湿润锋形状、大小和位置不尽相同,不同的剖面与湿润锋的相对位置亦不同(处于湿润体内、湿润锋边缘、湿润体外)。当不同处理的湿润锋出现在某一剖面位置时,致使该剖面的盐分质量比较高,从而使不同处理在该土层水平方向盐分质量比呈现不同的分布规律。

在对照地表滴灌中,水分在滴头下方的地表土壤达到饱和后在水平方向也缓缓向四周扩散,使半圆锥形湿润体在水平方向的盐分质量比也有所不同,如图4所示,图中数据为2011年8月1日的土壤盐分质量比。从图(处理CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub>、CK<sub>3</sub>)可以看出,在0~40 cm各土层中,靠滴头最近的A剖面盐分质量比最低,这是因为滴头下方水分不断下滴入渗,使离滴头最近的A剖面各层土壤经常保持较高的湿度而使土壤盐分质量比最低。随着与滴头水平距离的增加,B、C剖面各土层盐分呈增加的趋势。而在40~50 cm土层中,不同处理在水平方向的盐分质量比分布较不规则,这也可能与水平剖面位置

与湿润锋相对位置不同有关。

从以上结果看出,在2种滴灌条件下,位于湿润体内的土层在水平方向的土壤盐分质量比呈随着与出水口水平距离的增加而增大的趋势;但地表滴灌条件下,水分从地表进入土体,湿润体为半圆锥形,最大水平湿润锋出现在地表,地表各剖面土壤盐分得到较好的淋洗,使0~20 cm土层各剖面盐分质量比相对较低(图4d、4h、4l);间接地下滴灌条件下,水分在地表以下20~25 cm深度进入土体,最大水平湿润锋出现在该深度范围内,靠近该深度土壤各剖面土壤盐分得到较好的淋洗,使20~40 cm土层各剖面土壤盐分质量比较低。因此,间接地下滴灌能使枣树主要根区在水平方向形成较地表滴灌大的低盐范围。

## 2.2 灌水量及导水装置直径对土层脱盐率的影响

湿润体的特征影响着土层盐分的淋洗及分布,灌水量和导水装置直径是影响间接地下滴灌湿润体特征的主要因素,也会影响土层的脱盐效果。表4为单次灌水前、后(7月23日灌前、灌后)各处理对各层土壤脱盐率的影响(脱盐率为灌溉前土壤盐分质量比减去灌溉后土壤盐分质量比的差值占灌溉前土壤盐分质量比的百分比。表中正值表示脱盐,负值表示积盐,0则表示没有变化)。如表4所示,在间接地下滴灌条件下,各处理在10~40 cm土层均处于脱盐状态,当导水装置直径一定时,脱盐率随灌水量的增加而增大,体现出盐随水动的特点。导水装置直径对盐分的淋洗效果也存在差异,当灌水量一定时,10~40 cm土层脱盐率随导水装置直径的增加呈减小的趋势。在10~40 cm土层脱盐率以处

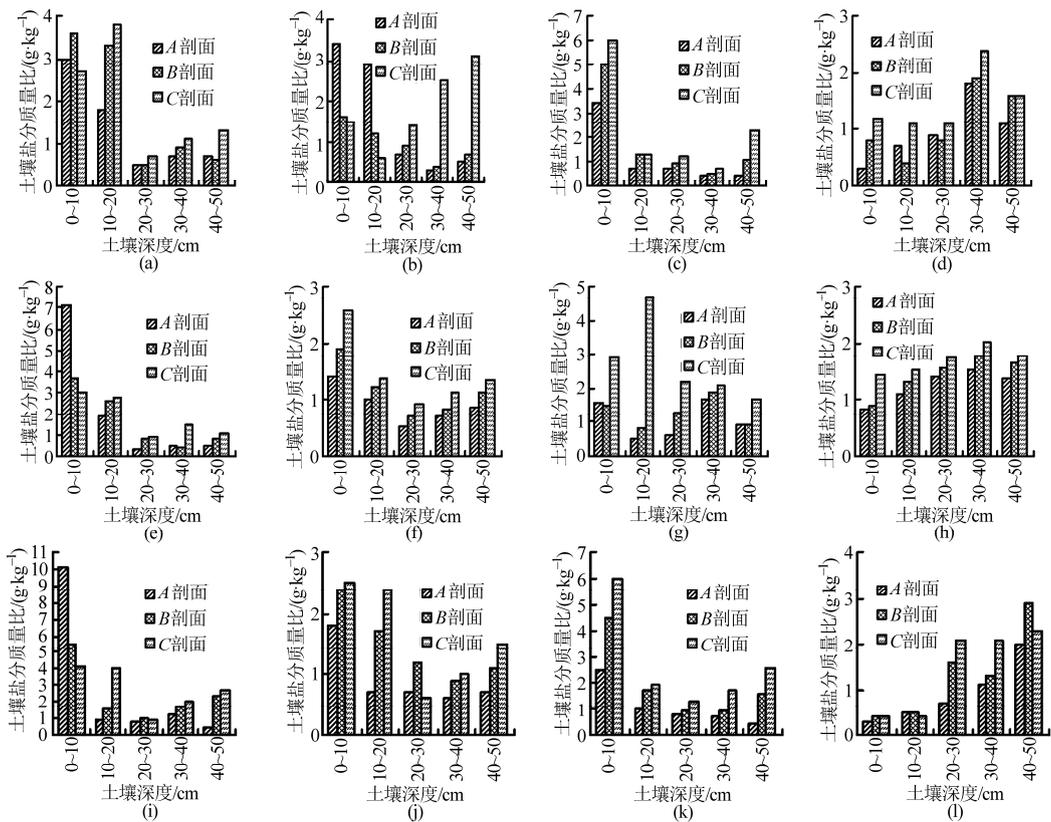


图 4 2 种滴灌方式下水平方向 0~50 cm 土层深度盐分质量比

Fig. 4 Salt accumulation changes in different soil layers of 0~50 cm in horizontal direction under indirect subsurface drip irrigation and surface drip irrigation

(a)  $D_1W_1$  (b)  $D_2W_1$  (c)  $D_3W_1$  (d)  $CK_1$  (e)  $D_1W_2$  (f)  $D_2W_2$  (g)  $D_3W_2$  (h)  $CK_2$  (i)  $D_1W_3$  (j)  $D_2W_3$  (k)  $D_3W_3$  (l)  $CK_3$ 

理  $D_1W_3$  时最高,脱盐率达 47.6%。

灌水量对 0~10、40~50 cm 土层脱盐率影响与 10~40 cm 土层基本一致。当导水装置直径一定时,脱盐率(积盐时脱盐率为负值)随灌水量的增加而增大;但当灌水量一定时,脱盐率随导水装置直径增大呈低-高-低的趋势(表 4)。在 0~10、40~50 cm 土层脱盐率均以处理  $D_2W_3$  时最高,脱盐率分别为 39.1%、39.6%。值得注意的是,灌水量为  $W_1$  的处理( $D_1W_1$ 、 $D_2W_1$ 、 $D_3W_1$ ) 在 0~10 cm 土层没有脱盐,全为积盐,灌水量为  $W_2$ 、 $W_3$  时该土层全为脱盐,导致这个结果的原因是当灌水量较小时,向上的湿润锋未达到土体表面,盐分在湿润锋边缘聚集,使灌溉后土壤盐分质量比大于灌前土壤盐分质量比,呈积盐状态,随灌水量的增加,向上的湿润锋达到表层土壤,使其盐分得到一定的淋洗。

通过分析可知,当灌水量一定时,10~40 cm 土层脱盐率随导水装置直径的增加而减小,但 0~10、40~50 cm 脱盐率随导水装置直径增大呈低-高-低的趋势。导水装置直径对各层土壤盐分淋洗影响的结果不一致,其原因可能是当灌水量一定时,湿润体体积随导水装置直径的增加而增大<sup>[15,20]</sup>,湿润体内土壤含水率增量随湿润体体积增大而减小,盐分淋

洗亦随土壤含水率增量减小而减弱,所以位于湿润体中心 10~40 cm 土层脱盐率随导水装置直径的增加呈减小的趋势。但当导水装置直径较小时( $D_1$ )形成的湿润体体积较小,0~10、40~50 cm 土层靠近湿润体边缘,灌溉后盐分在这 2 层土壤中有部分累积,造成该导水装置直径下 0~10、40~50 cm 土层脱盐率减小。当导水装置直径较大时( $D_2$ )形成的湿润体体积较大,0~10、40~50 cm 土层仍相对接近湿润体中部,所以脱盐率相对高于导水装置直径  $D_1$ ,而当导水装置直径再增大时( $D_3$ ),又呈现脱盐率随导水装置直径的增加而减小的规律,所以造成灌水量一定时,0~10 cm、40~50 cm 土层脱盐率以导水装置直径为  $D_2$  时最高。

### 2.3 枣树生育期内灌水量和导水装置直径对根区土壤平均盐分质量比的影响

在数据处理中,将不同处理每次所有土样(3 个剖面、5 个土层共 15 个土样点)的盐分质量比进行算术平均,作为该处理该次在 0~50 cm 土层平均盐分质量比,再分别将 7、8、9 月份内各次平均盐分质量比进行算术平均,作为每个月 0~50 cm 土层的平均盐分质量比,其变化如图 5 所示。

从图 5 可以看出,7—9 月份,导水装置直径为

表4 不同处理各土层深度土壤脱盐率变化

Tab.4 Changes of desalination rate of each soil layer under different treatments

土层深度/ cm	灌水水平	导水装置直径			
		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	CK
0~10	W <sub>1</sub>	-29.8	-27.3	-42.5	39.0
	W <sub>2</sub>	23.5	33.2	28.0	43.2
	W <sub>3</sub>	35.5	39.1	31.4	54.5
10~40	W <sub>1</sub>	30.8	25.4	25.0	7.2
	W <sub>2</sub>	43.4	39.7	32.5	24.0
	W <sub>3</sub>	47.6	44.0	37.1	34.0
40~50	W <sub>1</sub>	12.4	23.5	16.0	-22.4
	W <sub>2</sub>	25.0	33.2	23.5	20.0
	W <sub>3</sub>	26.3	39.6	25.6	22.0

D<sub>2</sub> 的3个处理 D<sub>2</sub>W<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>W<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>W<sub>3</sub> 较灌水量相同时的其他处理在 0~50 cm 土层盐分质量比低,尤其 D<sub>2</sub>W<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub>W<sub>3</sub>。0~50 cm 土层盐分质量比在时间上变化幅度较小,如处理 D<sub>2</sub>W<sub>3</sub>,在7月份土壤平均盐分质量比为各处理最低,仅 1.1 g/kg,8、9月份土壤盐分质量比分别为 2.3 g/kg、1.8 g/kg。处理 D<sub>2</sub>W<sub>2</sub> 在7—9月份土壤盐分质量比分别为 1.8 g/kg、2.0 g/kg、1.4 g/kg,7—8月份基本不变,9月份比7月份下降了22%,说明当导水装置直径为 D<sub>2</sub> 时适宜的灌水量对 0~50 cm 土层有较好的抑盐作用。处理 D<sub>1</sub>W<sub>1</sub>、D<sub>1</sub>W<sub>2</sub>、D<sub>1</sub>W<sub>3</sub>、D<sub>3</sub>W<sub>2</sub> 和 D<sub>3</sub>W<sub>3</sub> 在 0~50 cm 土层盐分质量比较高,尤其 D<sub>1</sub>W<sub>3</sub> 和 D<sub>3</sub>W<sub>3</sub> 在 0~50 cm 土层盐分质量比较高且在7—9月份中波动较大,说明导水装置直径过大或过小且灌水量较大时(W<sub>3</sub>)不利于 0~50 cm 土层抑盐。

另外,从图5可看出,无论是间接地下滴灌还是地表滴灌,8月份 0~50 cm 土层平均盐分质量比普遍比7月份高,到9月份有所下降。这是由于8月份气温较高,土壤蒸发及植株蒸腾强烈,且灌水次数

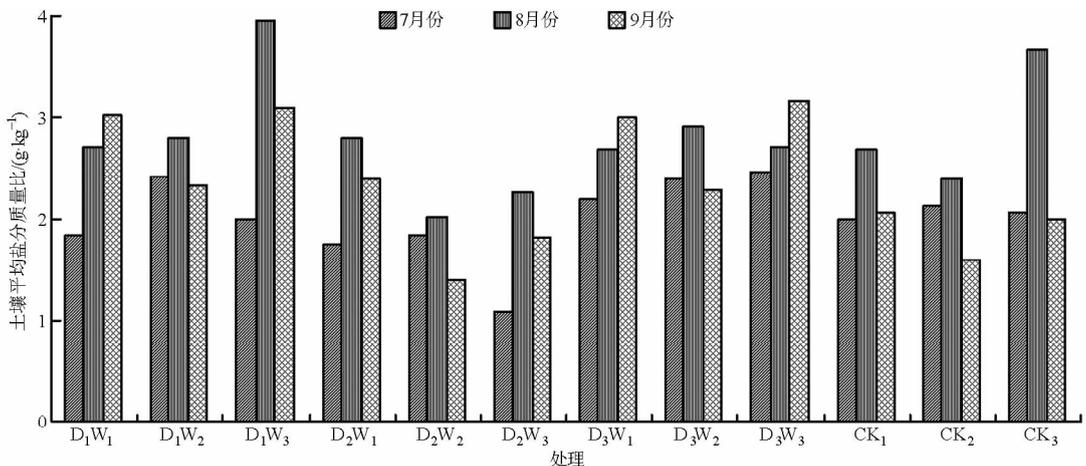


图5 不同处理下不同时期 0~50 cm 土层深度平均盐分质量比

Fig.5 Variation of mean salt mass ratio in 0~50 cm soil in different sampling stages and treatments

少于7月份,致使根区盐分重新积聚。9月份,经过气温回落,土壤蒸发和植株蒸腾减少,灌水后该层土壤平均盐分质量比呈下降趋势。

### 3 讨论

#### 3.1 间接地下滴灌“驱盐”效果分析

试验中导水装置埋深 20 cm,水分从地表以下 20~25 cm(5 cm 高的砂砾透水边界)深度范围进入土体,垂直方向上使靠近出水口 10~40 cm 土层平均盐分质量比较低,水平方向各剖面在 20~40 cm 土层盐分质量比较低,密植枣树的根系主要分布于 10~40 cm 土层,所以间接地下滴灌能使密植枣树的主要根系在较大水平和垂直范围内处于相对低盐的环境,有助于密植枣树的生长。但间接地下滴灌与地表滴灌也有类似之处,其“驱盐”作用有一定的局限性,只能将土壤盐分驱于湿润体外,为作物在生育期内提供相对低盐环境,而未能将土壤盐分淋洗出整个根层。南疆枣田一般没有排碱渠,当地下水位上升时,对防止土壤次生盐渍化十分不利<sup>[26]</sup>。因此,结合定期漫灌洗盐及恢复排碱沟是土壤脱盐的必要手段。

#### 3.2 选取根区土壤平均盐分质量比的原因

本文在分析灌水量和导水装置直径对根区土壤盐分质量比在枣树生育期内变化的影响时,选取根区土壤平均盐分质量比作为分析指标,相似的分析方法已有文献报道<sup>[27-28]</sup>。选取的主要原因是:通过分析单次灌水不同处理对各土层脱盐率影响后得出,不同处理对各土层淋洗效果不一致,有些处理在靠近出水口处淋洗效果好,但淋洗范围较小,这样在气温升高或作物根系吸收水分的情况下易于返盐;而有些处理在出水口处淋洗效果相对较弱,但淋洗范围较大,使得根区返盐现象得到一定抑制。为较合理地表征各处理在较大范围内(0~50 cm 土层在

以导水装置为圆心半径为 30 cm 水平距离内)的抑盐效果,采用了 0~50 cm 土层平均盐分质量比(3个剖面、5个土层平均盐分质量比)作为分析指标,该指标虽然弱化了不同剖面、不同土层的盐分分布特点,但能较好地反映各处理对整个根区抑盐效果的影响。

### 3.3 适宜的灌溉处理确定

单次灌水后各层土壤脱盐率较高的处理与7—9月份0~50 cm 土层抑盐效果较好的处理不尽相同(2.2、2.3节)。单次灌水后,当灌水量一定时,处理  $D_1W_3$  在 10~40 cm 土层脱盐率最高,但此处理导水装置直径较小,湿润锋范围亦相对较小,使土壤盐分有效淋洗的范围受到限制,而且在7—9月份0~50 cm 土层平均盐分质量比较高。单次灌水后处理  $D_2W_3$  在 10~40 cm 土层脱盐率相对低于处理  $D_1W_3$ ,但扩大了有效淋洗的范围,0~10、40~50 cm 土层脱盐率相对其他处理最高,同时在7—9月份0~50 cm 土层平均盐分质量比较低。然而,相对处理  $D_2W_3$ ,处理  $D_2W_2$  对 0~50 cm 土层也有较好的抑盐效果,而且灌水量相对较小,有利于节水。考虑节水抑盐效果,在此初步确定处理  $D_2W_2$  为适宜的灌溉处理,但最终确定适宜的灌溉处理应再结合作物的生长及产量等因素综合考虑。

### 3.4 需进一步研究的内容

当灌水量一定时,10~40 cm 土层脱盐率随导水装置直径的增加而减小,0~10、40~50 cm 土层脱盐率随导水直径增大呈低-高-低的趋势,导水装置直径对各层盐分淋洗影响的结果不一致。造成结果差异的原因在前文中根据前人研究资料、导水装置直径与湿润体特征(湿润体大小、湿润体内土壤含水率增量)的关系及湿润体特征对湿润体体内不同位置盐分淋洗的影响进行了理论探讨。但要揭示灌水量一定时,不同导水装置直径对湿润体内土壤

盐分分布及淋洗的影响规律,需对导水装置直径与湿润体特征(湿润体大小、湿润体内土壤含水率增量)的关系、湿润体特征与其土壤盐分质量比的空间分布及淋洗量的关系作进一步定量研究。

在本试验中,间接地下滴灌是当年首次使用,为了保证枣树的正常生长,前期采用漫灌的形式,6月10日开始间接地下滴灌,经间接地下滴灌时间较短,试验结果不可避免地会带有一定的局限性,经过多年长期间接地下滴灌后土壤盐分变化特征及灌溉对根层土壤盐分的调控机制还有待进一步跟踪研究。

## 4 结论

(1)在本试验条件下,间接地下滴灌在垂直方向10~40 cm 土层平均盐分质量比较低,水平方向20~40 cm 土层各剖面土壤盐分质量比较低。相对于地表滴灌,间接地下滴灌使密植枣树的主要根系在较大的水平和垂直范围内处于相对低盐的环境。

(2)单次灌水后,在10~40 cm 土层,导水装置直径一定时,脱盐率随灌水量的增加而增大;当灌水量一定时,脱盐率随导水装置直径的增加呈减小的趋势,在该土层脱盐率最高的处理为导水装置直径为 50 mm、灌水量为 17 L/(棵·次),脱盐率达 47.6%。在 0~10、40~50 cm 土层,导水装置直径一定时脱盐率随灌水量的增加而增大;当灌水量一定时,脱盐率随导水装置直径增大呈低-高-低的趋势。0~10、40~50 cm 土层脱盐率最高的处理均为导水装置直径为 75 mm,灌水量为 17 L/(棵·次),脱盐率分别为 39.1%、39.6%。

(3)在7—9月份中,当导水装置直径为 75 mm,灌水量分别为 13、17 L/(棵·次)时,0~50 cm 土层盐分质量比较其他处理低而且随时间变化幅度也较小。综合考虑节水、抑盐效果,确定导水装置直径为 75 mm、灌水量为 13 L/(棵·次)为适宜的灌溉处理。

## 参 考 文 献

- 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊1):98-105.  
Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.1): 98-105. (in Chinese)
- 王利春,石建初,左强,等. 盐胁迫条件下冬小麦根系吸水模型的构建与验证[J]. 农业工程学报,2011,27(1):112-117.  
Wang Lichun, Shi Jianchu, Zuo Qiang, et al. Establishing and validating the root water uptake model of winter wheat under salt stress conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 112-117. (in Chinese)
- 徐飞鹏,李云开,任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. 农业工程学报,2003,19(1):25-27.  
Xu Feipeng, Li Yunkai, Ren Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 25-27. (in Chinese)
- 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2008,24(8):15-19.  
Zhang Wei, Lü Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15-19. (in Chinese)
- 虎胆·吐马尔白,吴争光,苏里坦. 棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律数值模拟[J]. 土壤,2012,44(4):665-670.

- Hudan·Tumarbay, Wu Zhengguang, Su Litan. Numerical simulation of soil water-salt movement on drip irrigation cotton under film [J]. *Soils*, 2012, 44(4): 665–670. (in Chinese)
- 6 李晓明, 杨劲松, 刘梅先, 等. 南疆膜下滴灌棉花花铃期土壤盐分分布研究[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 289–292.  
Li Xiaoming, Yang Jingsong, Liu Meixian, et al. Study on soil salt distribution with drip irrigation under mulch in cotton boll period in south Xinjiang[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 289–292. (in Chinese)
- 7 刘国东, 郑德明, 姜益娟, 等. 南疆果园滴灌条件下土壤盐分的空间异质性分析—以农十四师 224 团典型地块为例[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1050–1056.  
Liu Guodong, Zheng Deming, Jiang Yijuan, et al. Spatial variability of soil salinity under drip irrigation conditions in orchard of southern Xinjiang: a case study on 224 regiment of 14 division[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1050–1056. (in Chinese)
- 8 姚宝林, 孙三民, 马洁, 等. 不同灌溉定额对滴灌红枣土壤水盐分布的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2011(4): 88–91.  
Yao Baolin, Sun Sanmin, Ma Jie, et al. Influence of irrigation quota on distribution of soil water and salinity for the drip irrigation of red jujube[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2011(4): 88–91. (in Chinese)
- 9 李金叶, 袁强, 蒋慧. 基于区域适应性的特色林果业发展探讨[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(4): 741–749.  
Li Jinye, Yuan Qiang, Jiang Hui. A discussion on development of featured forestry and fruit growing based on the regional adaptability[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(4): 741–749. (in Chinese)
- 10 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌导水装置规格参数模型[J]. *水利学报*, 2009, 40(3): 355–363.  
Zhao Weixia, Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, et al. Parameter model of water-conducting device specification for indirect subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3): 355–363. (in Chinese)
- 11 Meshkat M R C, Warner R C, Workman S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(1): 79–86.
- 12 Meshkat M R C. Modeling and laboratory evaluation of evaporation and moisture redistribution for drip/trickle and sand tube irrigation using undisturbed and reconstructed soils[D]. Kentucky: University of Kentucky, 1997.
- 13 Meshkat M R C, Warner R C, Workman S R. Comparison of water and temperature distribution profiles under sand tube irrigation [J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(6): 1657–1663.
- 14 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌导水装置规格参数模型研究[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(1): 5–9.  
Zhao Weixia, Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, et al. Parameter model of water-conduct device specification under indirect subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(1): 5–9. (in Chinese)
- 15 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 87–92.  
Zhao Weixia, Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, et al. Characteristic parameters of soil wetted volume under indirect subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4): 87–92. (in Chinese)
- 16 谢恒星, 蔡焕杰, 张振华, 等. 间接地下滴灌对温室甜瓜植株性状、品质和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3): 50–52.  
Xie Hengxing, Cai Huanjie, Zhang Zhenhua, et al. Effects of indirect subsurface irrigation on plant physiological characteristics, quality and yield of greenhouse muskmelon[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(3): 50–52. (in Chinese)
- 17 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 101–107.  
Xiao Juan, Jiang Peifu, Guo Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 101–107. (in Chinese)
- 18 王振华, 吕德生, 温新明. 流量对地下滴灌土壤水盐运移影响的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(6): 61–64.  
Wang Zhenhua, Lü Desheng, Wen Xinming. Experimental research on influence of discharge to soil water-salt transport under line source permeation of SDI[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(6): 61–64. (in Chinese)
- 19 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 不同滴灌方式对棉田土壤盐分的影响[J]. *水利学报*, 2011, 42(12): 1496–1503.  
Zai Songmei, Wu Feng, Wen Ji, et al. Effect of drip fertigation on soil salinity of cotton field in northwest China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(12): 1496–1503. (in Chinese)
- 20 李涛, 张建丰, 程慧娟, 等. 深层坑渗灌田间单点入渗湿润锋分布特性及拟合模型研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 36–39.  
Li Tao, Zhang Jianfeng, Cheng Huijuan, et al. The wetting front distribution characteristic and the fitting model of single point free infiltration under deep pit irrigation in the field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 36–39. (in Chinese)
- 21 姚宝林, 孙三民, 孙建, 等. 节水控盐滴灌对土壤盐分、红枣光合及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 148–152.  
Yao Baolin, Sun Sanmin, Sun Jian, et al. Influence of water-saving and salt-controlling drip irrigation on soil salt content, photosynthesis rate and red jujube yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 148–152. (in Chinese)
- 22 乔英, 孙建, 孙三民, 等. 滴灌条件下塔里木灌区骏枣根系分布的调查[J]. *节水灌溉*, 2012(3): 21–24.  
Qiao Ying, Sun Jian, Sun Sanmin, et al. Study on root distribution of jujube under drip irrigation in Tarim irrigation area[J].

- Water Saving Irrigation, 2012(3):21-24. (in Chinese)
- 23 张豫,王立洪,孙三民,等. 阿克苏河灌区棉花耐盐指标的确定[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2051-2059.  
Zhang Yu, Wang Lihong, Sun Sanmin, et al. Indexes of salt tolerance of cotton in Akesu river irrigation district[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(10): 2051-2059. (in Chinese)
- 24 张建丰,杨潇,帖西宁,等. 深层坑渗灌不同开孔方式单点土壤入渗特性研究[J]. 农业工程学报,2012,28(21):80-88.  
Zhang Jianfeng, Yang Xiao, Tie Xining, et al. Single point infiltration characteristics for different opening ways of irrigator of deep pit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 80-88. (in Chinese)
- 25 虎胆·吐马尔白,谷新保,曹伟,等. 不同年限棉田膜下滴灌水盐运移规律实验研究[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(2):72-77.  
Hudan·Tumaerbai, Gu Xinbao, Cao Wei, et al. Research on water-salt movement law of drip irrigation under the film in cotton field in different years[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(2):72-77. (in Chinese)
- 26 肖让,叶含春,张永玲,等. 南疆灌区无排水系统滴灌条件下地下水特性时空变化[J]. 灌溉排水学报,2011,30(5):135-139.  
Xiao Rang, Ye Hanchun, Zhang Yongling, et al. Temporal and spatial variation of groundwater under drip irrigation without drainage system on the oasis irrigation region in south Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5): 135-139. (in Chinese)
- 27 童文杰,陈中督,陈阜,等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. 农业工程学报,2012,28(10):131-137.  
Tong Wenjie, Chen Zhongdu, Chen Fu, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 131-137. (in Chinese)
- 28 巨龙,王全九,王琳芳,等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):86-90.  
Ju Long, Wang Quanjiu, Wang Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 86-90. (in Chinese)