

间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响

孙三民^{1,2} 安巧霞² 杨培岭¹ 陆小波² 顾凯凯²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为探讨间接地下滴灌及导水装置埋深(灌溉深度)对南疆极端干旱区矮化密植红枣根系生长分布特征及产量、水分利用率的影响,试验设间接地下滴灌(ISDI)3个导水装置埋深水平,分别为20、27、35 cm,以地表滴灌(DI)为对照,共4个处理,经过2~4 a的田间试验后,采用环状壕沟分层挖掘法对以枣树树干为中心,半径为1 m的90°扇形区域内0~100 cm土层进行根系取样。结果表明,相对于DI,ISDI下各根系分布较均匀,生长方向基本向下延伸;ISDI显著增加了根径小于5 mm根系根长密度,细根(根径小于2 mm)是DI的3倍,但减少了根径大于5 mm根系根长密度,相对增加了20~40 cm土层根系根长占总根长的比率;垂直方向上随着灌溉深度的增加表层根系根长密度相对减少,深层相对增加;水平方向上各处理根系根长密度基本呈现随着与树干水平距离的增加而减小的趋势,但在0~20 cm土层减小的幅度较大,在20~40 cm土层其减小的幅度较小;随着灌溉技术由DI到ISDI及灌溉深度的增加,细根分布基本呈现出由“宽浅型”向“深根型”发展的趋势。相对DI,ISDI具有较好的节水增产效果,提高产量及灌溉水生产率最大达20%。建议幼龄期南疆密植枣树的导水装置埋深为27~35 cm。研究为极端干旱区枣树适宜灌溉技术的选择及其技术要素的制定提供依据。

关键词: 枣树; 间接地下滴灌; 灌溉深度; 根系; 水分利用率

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0081-10

Effect of Irrigation Depth on Root Distribution and Water Use Efficiency of Jujube under Indirect Subsurface Drip Irrigation

Sun Sanmin^{1,2} An Qiaoxia² Yang Peiling¹ Lu Xiaobo² Gu Kaikai²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

Abstract: To investigate the effects of installation depths of water-conduct device on root distribution and root growth in dwarf close planting jujube under indirect subsurface drip irrigation (ISDI), three installation depths of water-conduct device were considered in the experiment. The installation depths of water-conduct device were 20 cm (T1), 27 cm (T2) and 35 cm (T3), respectively, with surface drip irrigation (DI) as comparison. Different depths, horizontal distances of jujube roots system distribution were obtained by annular ditch layered methods, the results showed that there were significant differences in jujube roots system distribution under DI and ISDI. On root morphology, root distributions were shallow and horizontal extension under DI. The distribution of root in different soil layers was uniform, and growth direction of root was basically downward under ISDI. ISDI significantly increased the root length density of fine roots ($d < 5$ mm), which increased by 1~2 times than that of DI. Root length density of $d > 5$ mm and root system distribution distance in horizontal direction were reduced, and the proportion of fine root length in 20~40 cm soil layer was increased. With the increase of depth of water-conduct device, the root length density of fine roots ($d < 2$ mm) was decreased in 0~20 cm soil layer

收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51069013、51369028)和国家级大学生创新创业训练计划项目(201410757004)

作者简介: 孙三民(1977—),男,博士生,塔里木大学副教授,主要从事农业节水灌溉技术与理论研究,E-mail: ssmqx@126.com

通信作者: 杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉排水理论与技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

and increased gradually in 20 ~ 60 cm in vertical direction under ISDI. In horizontal direction, the fine root length density of each treatment was comparatively concentrated distribution in 0 ~ 20 cm soil layer, 70% of root was distributed in horizontal range of 0 ~ 20 cm, the fine root distribution distance of each treatment was increased. With the increase of depth of water-conduct device, the horizontal distribution distances of roots of different diameter in 0 ~ 20 cm soil layer tended to be reduced, but that in 20 ~ 40 cm soil layer tended to be increased. Generally, with the increase of depth of water-conduct device, fine root distribution showed developing trend from shallow and wide to narrow and deep.

Key words: jujube tree; indirect subsurface drip irrigation; irrigation depth; root; water use efficiency

引言

根系是作物最活跃的吸收器官,作物对水分和养分的吸收能力以及产量的构成与根系生长分布关系密切^[1],土壤水分是影响作物根系生长发育的关键因素,土壤水分状况可调节根系生长,并调控地上部生长及产量形成^[2]。南疆地区干旱少雨,蒸发量大,种植于南疆地区的特色林果——枣树,已为当地经济和生态环境起到双赢作用^[3-4],地表滴灌技术在南疆枣树灌溉中是被广泛采用的一种灌水技术,但随着生产规模的扩大,其不足已凸现,如地表蒸发量较大、根系分布浅而影响枣树根系对深层土壤水分养分的吸收等,这不仅降低了水分利用效率,而且影响产量的提高及其抗旱性能^[5]。如何采用适宜的节水灌溉技术来调控根系生长分布特征,起到抗旱、节水增产的效果值得研究。

间接地下滴灌是一种新型的高效节水灌溉技术,由普通地表滴灌系统与布设在滴头下方土壤中的导水装置构成,导水装置包括上部分不透水边界(PVC管),下部分透水边界和透水底部(砂粒层),水由滴灌管经带有调节阀的小管滴入导水装置,再通过导水装置中粗砂到达透水边界,由透水底部入渗进入根区土壤。该灌溉技术通过地表滴灌的方式达到地下滴灌的效果,因而称为间接地下滴灌(ISDI)。其特点是将水分通过导水装置直接输送至作物根区,地表土壤保持相对干燥,减少了土壤表面无效水分的蒸发,达到水分高效利用的目的,适合稀植作物的灌溉^[6]。国内外学者对 ISDI 下水盐运移、导水装置规格模型等方面进行了一些研究^[6-8],也有学者对 ISDI 下作物的产量及水分利用率做了一些研究,结果表明相对地表滴灌(DI),ISDI 具有一定的节水增产效果^[9],但对其增产的机理缺乏探究。根系生长和分布是影响作物产量及水分利用率的关键因素,所以有必要对 ISDI 下根系生长和分布及产量、水分利用率的关系做进一步研究。

学者们对灌溉深度与根系生长分布的关系做了一些研究,MACHADO 等^[10-11]研究了毛管埋深

可以改变番茄和玉米根系在垂直水平方向的生长分布。ZHUGE 等^[12]研究表明地下滴灌下条件埋深 30 cm 番茄根系活力较强,同时毛管埋深对根系特征的有效调控,可以提高水分吸收利用及作物产量。但通过 ISDI 下导水装置埋深对枣树根系特征的调控及对产量、水分利用率影响的研究鲜见报道。本文通过 ISDI 与 DI 对比研究,分析 ISDI 灌溉技术及导水装置埋深对干旱区红枣枣树根系生长和分布特征的影响及其与产量和水分利用率的关系。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于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(80°30'N,40°22'E)。该站所在区属典型的大陆性干旱荒漠气候,多年平均降水量为 67 mm 左右,年平均日照时间达 2 865 h,年均气温为 10.7℃,大于等于 10℃ 积温为 4 113℃,多年平均蒸发量为 2 110 mm,2011—2014 年枣树生育期月降水量及平均气温见图 1。试验地土壤理化性状见表 1。

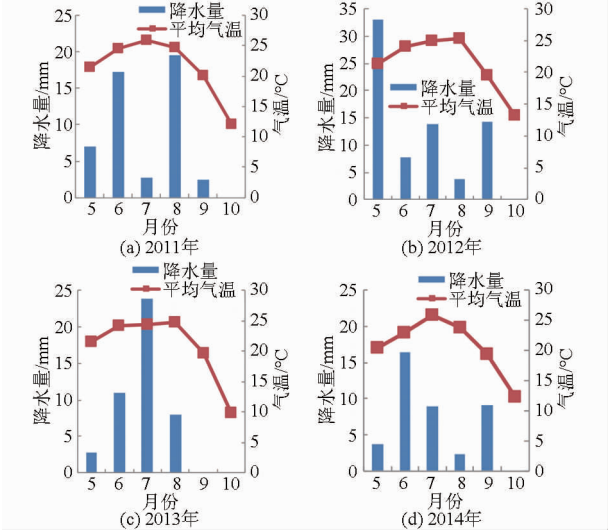


图 1 试验期枣树生育期月降水量及平均气温

Fig. 1 Rainfall and average temperature in growth period of jujube trees in 2011—2014

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	土壤性质	土壤饱和含水率/%	田间持水量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	pH 值	含盐量/%
0~10	沙壤土	28.37	19.43	1.38	8.18	0.19
10~20	沙壤土	28.39	19.18	1.39	8.19	0.17
20~30	沙壤土	27.68	19.22	1.40	8.25	0.14
30~40	粘土夹层	30.46	26.43	1.43	8.43	0.15
40~50	沙土	27.87	24.15	1.42	8.24	0.13
50~60	沙土	27.87	24.15	1.42	8.24	0.12
60~80	沙土	27.87	24.07	1.42	8.46	0.12
80~100	沙土	27.87	24.07	1.42	8.46	0.12

1.2 ISDI 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经由透水底部入渗进入根区土壤。安装时用取土器钻孔取土,土洞直径略大于导水装置直径,深度大于 PVC 管埋深 5 cm,再将直径为 75 mm 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。

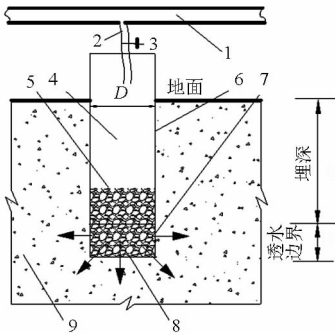


图 2 ISDI 灌水器示意图

Fig.2 Diagram of indirect subsurface drip irrigation irrigator

1. 滴灌管 2. 小管 3. 控制阀 4. 导水装置 5. 砂砾石 6. 不透水边界 7. 透水边界 8. 透水边界底部 9. 根区土壤

1.3 试验设计

种植枣树选择当地普遍栽培的骏枣 (*Ziziphus Jujube* Mill.), 种植方式为矮化密植,枣林于 2009 年嫁接,2010 年开始每年春天实施矮化修剪。试验设计为 DI 和 ISDI 2 种。DI(CK)从 2011 年 4 月开始实施灌溉处理,ISDI 导水装置埋深(指 PVC 管埋深,由于水分从透水边界和透水底部(砂粒层)渗入土体,灌溉水深度实际在 PVC 管埋深以下 0~5 cm)设

3 个水平:分别为 20 cm(T1)、27 cm(T2)和 35 cm(T3)。T1 从 2011 年 4 月实施灌溉处理。为了研究导水装置埋深变化对根系的调控作用,T2、T3 处理 2011 年 4 月—2013 年 4 月导水装置埋深为 20 cm,从 2013 年 4 月份(果树萌芽展叶前期)调整导水装置埋深分别为 27、35 cm。共 4 个处理,每处理 3 个重复,共 12 个小区。每个处理在 2011—2012 年滴灌量均为 13L/(棵·次),2013—2014 年滴灌量均为 14 L/(棵·次)(灌水量及灌溉时间依据前期研究密植枣树在地表滴灌条件下不同生育期耗水量^[13],同时灌水量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;考虑枣树逐年生长时其需水量增大,试验设计 2013—2014 年间的灌水定额比 2011—2012 年间大;由于本地年降水量小,本试验不考虑降水对灌溉量的影响。灌溉时间采用不同生育期定期灌溉的方式),滴头流量均为 3 L/h,导水装置直径 75 mm,透水边界高 5 cm。

在导水装置埋深调整时难免会对根系造成损伤,为了尽量减少损伤,操作时将原来埋深为 20 cm 的导水装置(PVC 管)拔出,在原位用取土钻向下分别取土 7、15 cm 后,再将导水装置安装到位,T2、T3 处理伤及根系的土体体积分别为 0.03、0.07 m³,因而导水装置埋深调整后对根系的损伤很小。

1.4 种植方式和灌溉施肥

选取相邻 3 棵枣树为一个小区,呈南北向直线排列,株距 1 m、行距 2 m。试验区东西方向铺设支管,南北方向铺设滴灌管,一根滴灌管控制一行,采用一管一行式布置,每根滴灌管上设阀门和水表单独控制小区灌水量。在 ISDI 的试验小区中,每棵树设置 1 个导水装置,布置在滴灌管下方,与树干水平距离 200 mm 处,滴灌管(管径 16 mm,壁厚 0.9 mm)距离树干为 200 mm。DI 试验小区滴灌管布置方式同 ISDI 小区,在与树干水平距离 100 mm 处设出水孔。试验灌溉在每年 4 月底或 5 月初开始至 9 月中旬结束。每年的滴灌时间基本一致,灌溉制度见表 2。为了土壤淋洗盐分 and 保持底墒,在春季萌芽展叶期前期和秋季果实收获后采用漫灌形式灌水,灌水定额 1 200 m³/hm²。

试验小区安装微型滴灌砂石过滤器和微型施肥罐。肥料采用枣树专用滴灌肥,每次施枣树专用肥 75 kg/hm²,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。

1.5 样品采集和测定

(1) 土样的采集与指标测定

取样时间:灌水 24 h 后。取土位置:在 ISDI 试

表 2 灌溉制度
Tab.2 Irrigation schedule

L/棵

时间	阶段灌水定额						灌溉定额
	萌芽展叶期	花期	初果期	果实膨大期	果实成熟初期	果实成熟后期	
	(04-10— 05-21)	(05-22— 06-26)	(06-27— 07-18)	(07-19— 08-25)	(08-26— 09-05)	(09-06— 10-15)	
2011—2012 年	13	26	26	52	13	13	143
2013—2014 年	14	28	28	56	14	14	154

验中,以导水装置为中心,垂直于滴灌管方向,与导水装置水平距离分别为 10、20、30 cm 剖面处(分别称为 A、B、C 剖面),以 10 cm 为一个土层取土,取土深度为 1 m。在 DI 中,以靠近树干的滴头下方地表为中心,垂直于滴灌管方向,与滴头水平距离分别为 10、20、30 cm 处取土,取土深度同上(图 3a)。所取的土样带回实验室进行测试分析,土壤含水率采用干燥法测定。

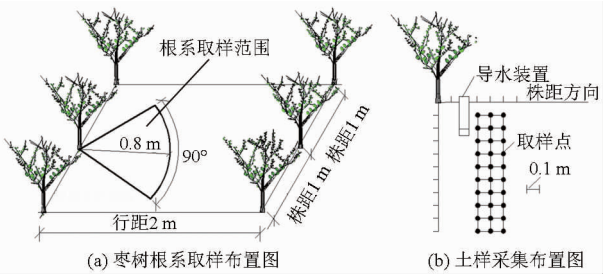


图 3 试验取样的布置图

Fig.3 Layout of experiment samples

(2)根系取样方法

2015 年 4 月采用环状壕沟分层挖掘的方法对以枣树树干为中心、半径为 1 m 的 90°扇形区域内 0~100 cm 土层的根系进行取样:为了提高挖根后枣树的存活率及避免相邻树根系影响,采样时在株行间选取 90°扇形区域挖取,以植株为中心,剖面挖掘由外至内,从离树干的最远端开始(图 3b)。具体操作方法为:采样前先用卷尺由树干向外拉一条直线,在距树干半径为 20、40、60、80、100 cm 处画圆弧

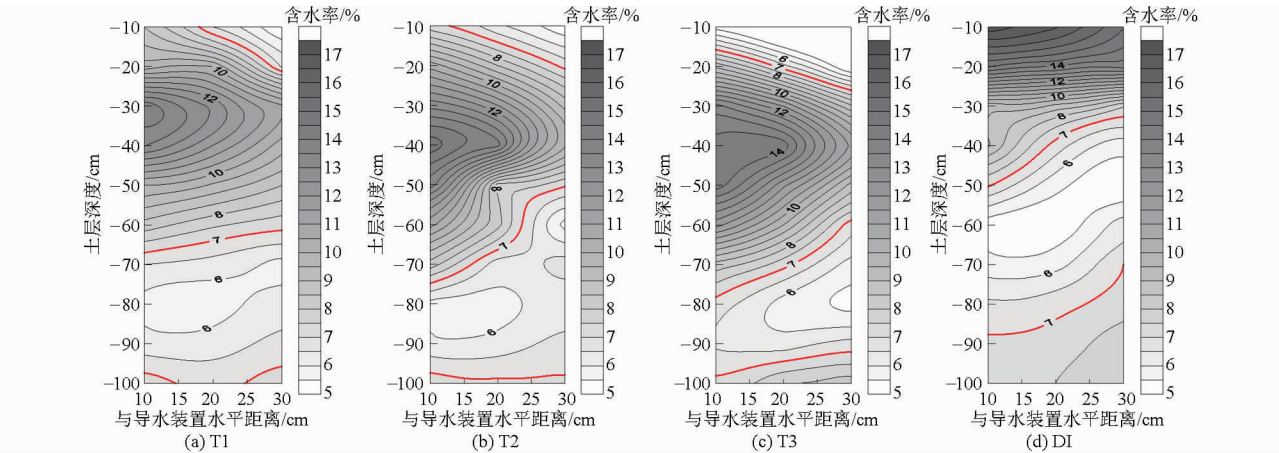


图 4 单次灌水后不同处理枣树根区土壤含水率空间分布

Fig.4 Spatial distributions of soil water in jujube root zone under different treatments after a single irrigation

并打桩标记,两圆弧之间即为剖面挖掘部位。挖掘时自 100 cm 剖面处自地面开始向下挖,每 20 cm 为一层,挖掘过程中向内向下逐剖面逐层调查,用卡尺测量不同剖面土层内根系的直径和长度,同时记录每一层的土壤质地。

1.6 数据处理及分析

灌溉水分生产率是指每 1 m³ 水生产出的果实产量,以果实产量与灌溉水量的比值或果实产量与耗水量的比值来表示,公式为

$$P = \frac{Y}{W_i}$$
 (1)

式中 P——灌溉水分生产率,kg/m³
Y——作物总产量或平均产量,kg 或 kg/hm²
W_i——总灌溉用水量或单位面积灌溉用水量, m³或 m³/hm²

用 Excel 2007、SPSS 18.0 软件对数据进行处理及方差分析,5% 显著水平。

2 结果与分析

2.1 滴灌方式及导水装置埋深对各土层含水率分布的影响

图 4 为 2 种滴灌方式下单次灌水后土壤水分的空间分布特征(2014 年 7 月)。由于 2 种灌水方式下灌溉深度不同,土壤含水率在垂直方向的分布有较大的差异。ISDI 下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含

水率接近饱和时,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,在垂直方向水分呈向上和向下 2 个方向运动,以靠近出水口土壤含水率最大,最大水平湿润距离出现在导水装置里砂柱的底部^[6]。本试验中,T1、T2、T3 处理出现最大含水率、最大水平湿润距离的土层分别在地表下 25 ~ 35 cm、35 ~ 45 cm、40 ~ 50 cm(图 4),含水率为 7% 的等值线最深分别出现在 67、74、79 cm 土层,说明随着导水装置埋深的增加,出现最大含水率、最大水平湿润距离的土层及湿润深度均逐渐下移。

在 DI 下,水分从地表以点源方式进入土体,形成以滴头下方土体为中心类似半圆锥体的湿润体^[14],最大水平湿润距离和土壤最大含水率均出现在地表。

2.2 不同滴灌方式下根系形态、生长分布特征

2.2.1 2 种滴灌方式下根系形态

通过比较可知 2 种滴灌方式下根系分布、根量差异明显(图 5)。DI 处理下细根、粗根(根系)分布较浅,同时细根根毛稀疏,粗根直径较大,大部分根系基本与地表呈水平分布。ISDI 处理下细根、粗根和主根根系分布较均匀,细根较稠密、粗根直径较小,根系生长方向基本向下,与地表的夹角约 60°。

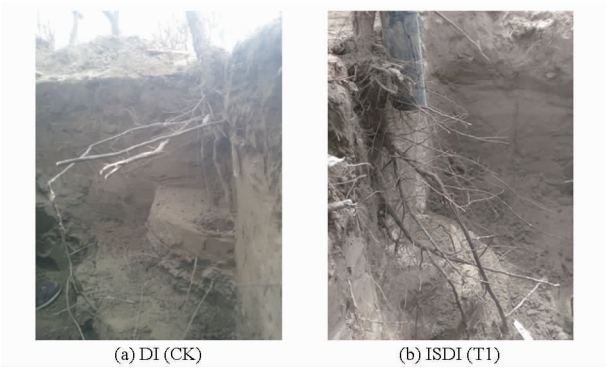


图 5 2 种滴灌方式下根系形态

Fig. 5 Images of root morphologies for two kinds of drip irrigation

原因可能是:DI 下水分以地表土壤含水率最大,最大水平湿润峰也出现在地表,水平运移的水分诱导根系呈水平分布;在 ISDI 下靠近出水口处土壤含水率最高,由于根系的向水性,使得根系基本呈向下生长的趋势。

2.2.2 2 种滴灌方式下根系垂直方向分布特征

滴灌方式对各根径的根长密度影响显著(表 3), $d < 2\text{ mm}$ 和 $d = 2 \sim 5\text{ mm}$ (d 表示根径)根系根长密度,T1 处理显著大于 CK 处理,T1 根长密度是 CK 的 3 倍左右; $d > 5\text{ mm}$ 根系的根长密度,在大部分土层 T1 均小于 CK。说明 ISDI 有助于增加 $d < 5\text{ mm}$ 根系的生长,而不利于 $d > 5\text{ mm}$ 根系的生长。

有学者研究表明地下滴灌下林木在 20 ~ 50 cm 土层内细根量是地表常规灌溉的 2.9 倍,同时粗根量也增加 20.8%^[15]。本研究表明 ISDI 显著增加了根系 $d < 5\text{ mm}$ 的根量,这点与前人研究结果一致,但不同之处在于 ISDI 对 $d > 5\text{ mm}$ 根系产生抑制作用,根据肖元松等^[16]研究结论,增氧栽培有利于桃幼树 $d < 3.5\text{ mm}$ 细根的发生和生长,抑制 $d > 3.5\text{ mm}$ 较粗根系的发生和生长。这可能是在 ISDI 下导水装置中的透水层为砂砾,能起到透气增氧的作用,使深层土壤透气性改善,抑制了 $d > 5\text{ mm}$ 根系的生长。

2 种滴灌方式下不同根径的根长密度总体上均呈现随土层深度增加而减少的趋势(见表 3,表中 η 表示某土层根系根长占总土层深度 0 ~ 100 cm 总根长百分比),这与 RUIZ 等^[17]、田盼盼等^[18]得出的结果相近。但在 20 ~ 40 cm 土层,T1 处理各根系根长占总根长的比率显著大于 CK 处理,说明 ISDI 处理根长密度峰值较 DI 的峰值下移,使表层的根系分布相对减少。这与郝锋珍^[19]研究蓄水坑灌下根系根长密度峰值较地面灌下移的结果较为一致。

2.2.3 2 种滴灌方式下根系水平方向分布特征

2 种滴灌方式下,水平方向各根系根长密度随

表 3 垂直方向上 2 种滴灌方式下根系分布

Tab.3 Vertical distribution of root system under two kinds of drip irrigation												
深度/ cm	$d < 2\text{ mm}$				$d = 2 \sim 5\text{ mm}$				$d > 5\text{ mm}$			
	T1		CK		T1		CK		T1		CK	
	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %	平均根 长密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	η / %
0 ~ 20	364.3 ^{aA}	39.2	125.9 ^{aB}	42.2	53.5 ^{aA}	33.7	37.6 ^{aA}	49.6	24.6 ^{aA}	36.5	27.9 ^{aA}	34.1
20 ~ 40	292.9 ^{aA}	31.4	59.2 ^{bB}	19.8	50.7 ^{aA}	32.0	10.4 ^{bB}	13.7	20.7 ^{aA}	33.7	19.8 ^{bA}	19.3
40 ~ 60	96.8 ^{bA}	10.4	37.9 ^{bB}	12.7	19.4 ^{bA}	12.2	10.0 ^{bB}	13.2	8.0 ^{bB}	11.8	16.4 ^{bA}	20.0
60 ~ 80	162.1 ^{bA}	17.5	30.6 ^{bB}	10.3	35.1 ^{bA}	22.1	17.1 ^{bB}	22.5	12.1 ^{bB}	18.0	21.5 ^{bA}	23.8
80 ~ 100	14 ^{cB}	1.5	44.8 ^{bA}	15.0			0.8 ^c	1.0			2.3 ^c	2.8
平均/合计	186	100	59.7	100	39.7	100	15.2	100	16.9	100	16.4	100

注:小写字母为同列比较,大写字母为同行比较。不同字母表示处理间差异达 5% 水平,下同。

距离的增加而减少,中间出现 2 个高峰(表 4),其分别出现在距树干 20 cm、40 ~ 80 cm 范围内。这与前人研究结果基本一致^[21];第 1 个“高峰”出现在出水口附近,原因可能是靠近出水口附近土壤含水率最大,由于根系的向水性,出现了第 1 个“高峰”。出现第 2 个“高峰”的原因可能跟根系的趋水性和根系的重叠有关^[20],由于在湿润体内,随着水平距离的增加,含水率逐渐减少,根系根长密度逐渐减少,

在湿润体边缘处,为了吸收更多水分,相邻 2 棵树的根系在此产生叠加。

总体来看,在水平方向上 ISDI 根系的根长密度均显著大于 DI,而且 2 种滴灌方式下根系的分布也有差异,ISDI 处理 85% 的细根($d < 2$ mm)分布在距树干 0 ~ 60 cm 内;DI 处理 76% 的细根($d < 2$ mm)分布在距树干于 0 ~ 60 cm 内,说明 ISDI 较 DI 减少了根系在水平方向上的分布范围。

表 4 水平方向 2 种滴灌方式下根系分布
Tab. 4 Radial distribution of root system under two kinds of drip irrigation

水平距离/ cm	$d < 2$ mm				$d = 2 \sim 5$ mm				$d > 5$ mm			
	ISDI		DI		ISDI		DI		ISDI		DI	
	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %	平均 根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$)	η / %
0 ~ 20	671.2 ^{aA}	58.6	187.7 ^{aB}	52.2	128.1 ^{aA}	64.6	81.7 ^{aB}	73.1	41.3 ^{aB}	48.9	73.2 ^{aA}	65.5
20 ~ 40	123.8 ^{bA}	10.8	31.5 ^{bB}	8.7	28.5 ^{bA}	14.4	7.5 ^{bB}	6.7	15.9 ^{bA}	18.8	20.2 ^{bA}	18.0
40 ~ 60	177.0 ^{cA}	15.5	56.3 ^{bB}	15.7	17.3 ^{bA}	8.7	11.9 ^{bA}	10.6	4.4 ^{cA}	5.2	8.2 ^{cA}	7.3
60 ~ 80	112.4 ^{bA}	9.8	78.6 ^{bB}	21.9	16.5 ^{bA}	8.3	8.9 ^{bA}	7.9	12.8 ^{bA}	15.2	9.1 ^{cA}	8.1
80 ~ 100	60.7 ^{dA}	5.3	5.5 ^{cB}	1.5	8.1 ^{bA}	4.0	1.9 ^{cB}	1.7	10.1 ^{bA}	11.9	1.3 ^{cB}	1.1
平均/合计	229	100	59.7	100	39.7	100	22.4	100	16.9	100	22.4	100

从图 6 可以看出,各处理 $d < 2$ mm 的细根主要分布在 0 ~ 80 cm 的土层中,T2、T3 处理在土壤深度方向的分布呈现减小的趋势(图 6a),而 T1 处理在 0 ~ 60 cm 土层随土壤深度方向的分布基本呈现减小的趋势,在 60 ~ 80 cm 土层有所增加,各处理细根

根长密度随着土层深度基本呈对数关系。不同处理下 $d < 2$ mm 细根根长密度在不同土层分布特征存在一定差异,在 0 ~ 20 cm 土层,不同处理的细根根长密度大小顺序是 T1、T2、T3;在 20 ~ 60 cm 土层, T3 处理细根根长密度显著大于其他处理。

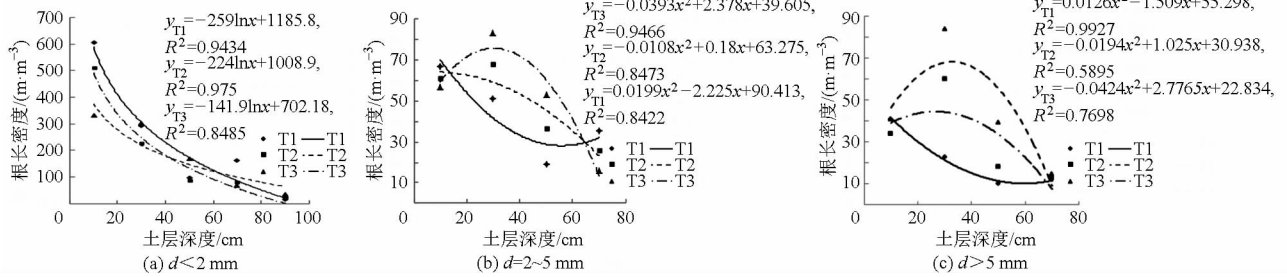


图 6 不同导水装置埋深下根系垂直分布变化

Fig. 6 Vertical distribution changes of root system in different installation depths of water-conduct device

各处理 $d = 2 \sim 5$ mm 及 $d > 5$ mm 根系的根长密度随着土层深度基本呈二次抛物线关系(图 6b、6c),T1 处理在土壤深度方向的分布基本呈现由大一小的趋势,而 T2、T3 处理基本呈现小一大一小的趋势。不同灌溉深度对 $d = 2 \sim 5$ mm 及 $d > 5$ mm 根系在各土层分布影响更加显著,随着灌溉深度的增加,根系在土层 20 ~ 40 cm 的根长密度显著大于 0 ~ 20 cm 土层,尤其是 T3 处理下的 $d > 5$ mm 根系在 20 ~ 40 cm 土层根长密度是 0 ~ 20 cm 土层的 2 倍左右,各处理 $d = 2 \sim 5$ mm 及 $d > 5$ mm 的根长密度在该土层大小顺序是 T3、T2、T1。说明

灌溉深度影响根系总量和根系在各土层内的分布^[21],随着灌溉深度的增加,表层根长密度相对减少,深层根系根长密度相对增加,即深层土壤的含水率的增加,有利于根系下扎。

T1 处理下,在 0 ~ 60 cm 土层中,各根系根长密度随着土壤深度的增加而减少,而在 60 ~ 80 cm 土层中各根系根长密度随着深度的增加而增加。席本野^[22]研究表明,在细根根长密度在 0 ~ 50 cm 土层中随深度的增加急剧减小,在 50 ~ 90 cm 土层中随深度的增加而增大。这可能是由于导水装置埋深较浅时,灌溉水分不能达到土壤深层,作物为了补偿水

分、养分吸收,使根系在 60 ~ 80 cm 土层出现第 2 个生长高峰。而在导水装置埋深较深的 T2、T3 尤其是 T3 处理下,没有发现第 2 个高峰出现,这可能意味着此埋深的导水装置所形成的湿润范围相对能满足作物根系生长,根系不需进一步向下生长。

2.2.4 导水装置埋深对根系在水平方向分布影响

从图 7 可以看出,各处理根系根长密度基本呈现出随着与树干水平距离的增加而减小的趋势,但

在 0 ~ 20 cm 土层减小的幅度较大,在 20 ~ 40 cm 土层其减小的幅度较小。其可能原因是,在本试验中导水装置埋深在 20 ~ 35 cm 之间,灌水后在 20 ~ 40 cm 土层出现最大水平湿润距离,使根系能在较大范围内处于湿润体内,同时随着与导水装置水平距离的增加,湿润体内水分的逐渐减少,根系根长密度呈缓慢减少的趋势。而在 0 ~ 20 cm 土层,水平湿润锋运移距离较小,湿润体所包含根系较少,而湿润体外的根系因水分的急剧减小而降低幅度较大。

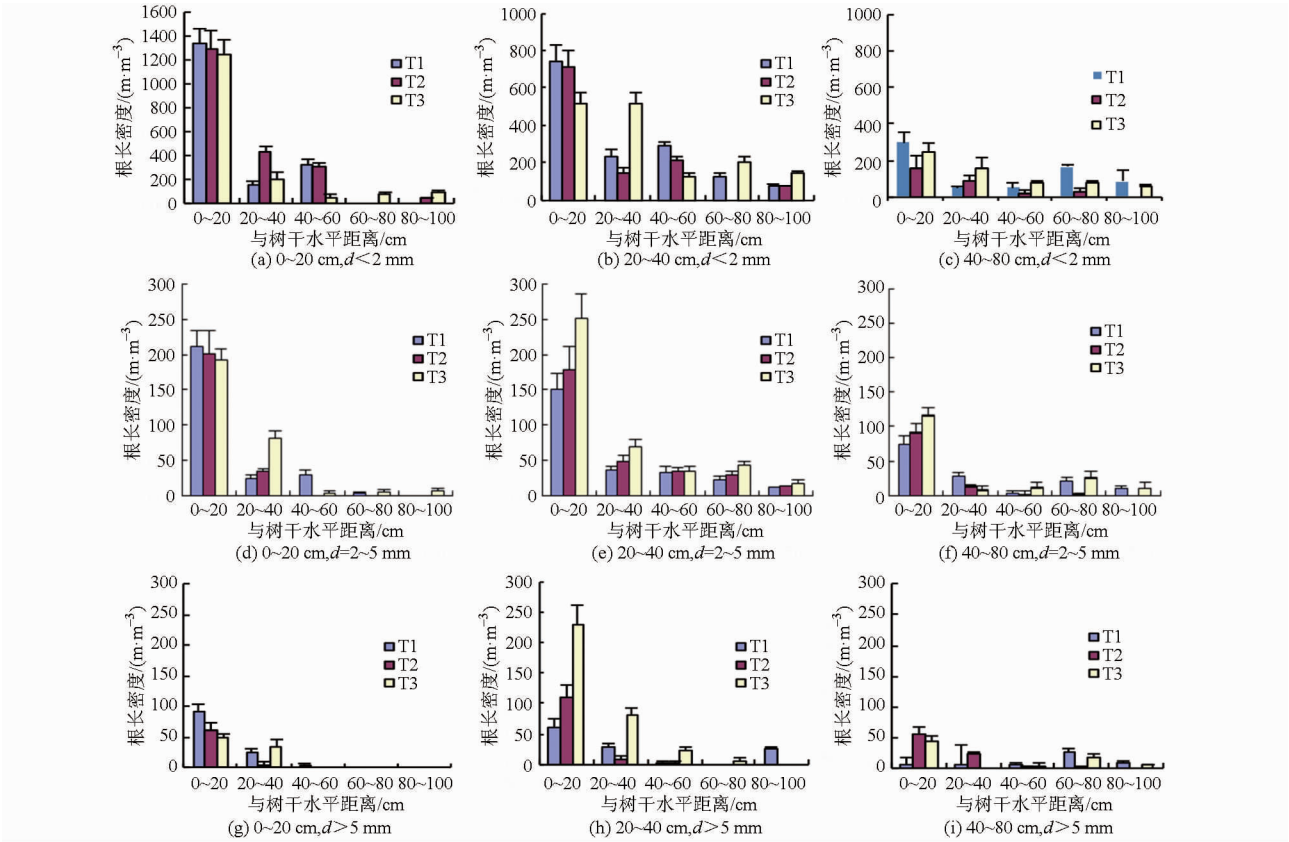


图 7 不同导水装置埋深下根系在不同土层的水平分布

Fig. 7 Horizontal distributions of root system in different soil layers and installation depths of water-conduct devices

2.3 不同滴灌方式及导水装置埋深对根系空间分布的影响

由图 8a 表明,在 DI 下,大部分细根分布较浅而在水平方向分布距离较大,这是由于含水率最大的

土层和最大水平湿润距离出现在地表,促使细根在土壤表层生长同时在水平方向分布距离较大。研究表明,灌溉深度可以显著地改变根系的垂直和水平分布^[8,20]。在本次试验中,随着导水装置埋深的增

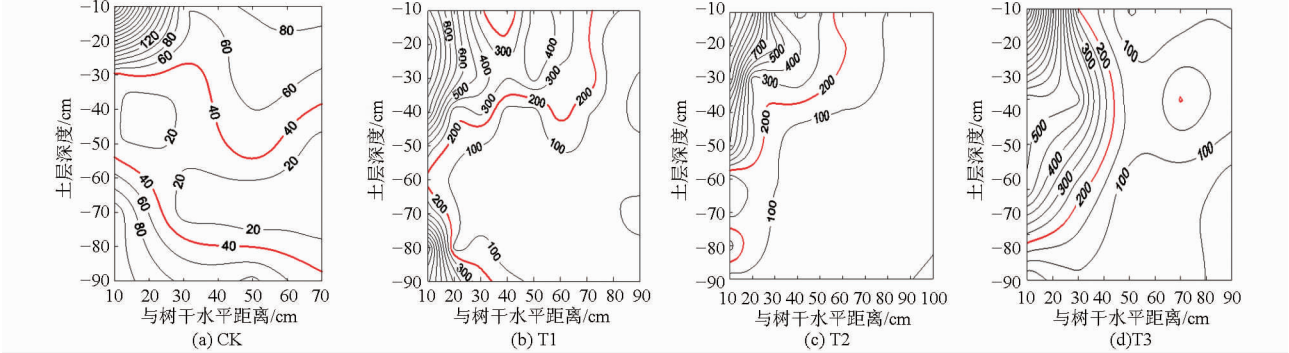


图 8 DI 及 ISDI 下细根 ($d < 2\text{ mm}$) 根长密度空间分布 (单位: m/m^3)

Fig. 8 Fine root length density distributions of DI and ISDI (unit: m/m^3)

大,在垂直方向上,细根的根长密度峰值呈下移的趋势(图 8b~8d),如 T1 处理下细根根长密度峰值出现在土层深度 20~40 cm 处,T3 处理下其峰值出现在 40~50 cm 处。这说明随着导水装置埋深的增加,细根根长密度在垂直方向上的分布范围由“浅”到“深”。随着导水装置埋深的增大,细根在水平方向上的分布范围由“宽”到“窄”,如 T1 处理大部分细根分布在与树干水平距离 70~80 cm 以内,而 T3 处理大部分细根分布在 40~50 cm 以内。总体上,随着灌溉技术由 DI 到 ISDI 及灌溉深度的增加,细根分布基本呈现出由“宽浅型”向“深根型”发展的趋势。

对枣树细根($d < 2\text{ mm}$)根长密度与距树干水平距离和土层深度进行回归分析,得出枣树细根($d < 2\text{ mm}$)根长密度在二维空间分布的指数函数模型为

$$D_L(z,r) = ae^{b|z+c|+d|r+f|}$$

(2)

式中 D_L ——细根根长密度, m/m^3
 z ——土层深度, cm
 r ——与树干水平距离, cm
 $a、b、c、d、f$ ——拟合参数

各处理下模型的拟合参数如表 5 所示。其决定系数均在 0.82 以上,说明该指数函数模型能够反映细根根长密度在二维空间分布的规律。

表 5 细根根长密度的空间分布模型参数拟合结果

Tab.5 Results of fitting on spatial distribution model of fine root length density

处理	模型	R^2
T1	$D_L(z,r) = 4.35e^{0.036 z-56 +0.063 r-74 }$	0.88
T2	$D_L(z,r) = 27.6e^{-0.053 z-11 +0.062 r-78 }$	0.98
T3	$D_L(z,r) = 50.34e^{-0.033 z-11.7 +0.055 r-68 }$	0.84
CK	$D_L(z,r) = 0.056e^{0.118 z-45 +0.058 r-90 }$	0.82

2.4 不同滴灌方式及导水装置埋深对枣树产量及灌溉水分生产效率的影响

不同滴灌方式下枣树产量差异显著(表 6, $p < 0.05$),T1、T2、T3 处理枣树产量、灌溉水生产效率均显著大于 CK,较 CK 2 a 间平均增产分别为 15%、18%和 20%。说明 ISDI 有很好的节水增产效果。枣树产量及灌溉水生产效率随着灌溉深度的增加而增大,但 T1、T2 处理间差异显著,T2 与 T3 处理间差异不显著,说明当导水装置埋深大于一定深度时(27 cm),再增加埋深其节水增产效果并不明显。

3 讨论

本研究得出 ISDI 较 DI 最大提高枣树产量及水分利用率为 20%,其原因可能是细根作为作物吸收土壤水分和养分的唯一通道,其形态和分布直接反

表 6 不同处理对红枣产量及灌溉水分生产效率的影响

Tab.6 Effects of different treatment on yield and irrigation water use efficiency of jujube

年份	处理	产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	总灌水量/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌溉水生产效率/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
2013	T1	2 605 ^b	770	3.38 ^b
	T2	2 718 ^a	770	3.72 ^a
	T3	2 733 ^a	770	3.77 ^a
	CK	2 242 ^c	770	2.91 ^c
2014	T1	2 502 ^b	770	3.25 ^b
	T2	2 605 ^a	770	3.51 ^a
	T3	2 631 ^a	770	3.55 ^a
	CK	2 191 ^c	770	2.85 ^c

映了林木对土壤资源的利用状况^[21]。根系生理功能几乎全部由细根($d < 2\text{ mm}$)完成,是植物吸收水分和养分的重要器官^[23],本研究中 ISDI 下细根密度是 DI 的 3 倍,ISDI 加大了枣树对水分和养分的吸收,这可能是其节水增产效果原因之一。另外,DI 下水分以地表土壤含水率最大,根系主要分布区在地表,而 ISDI 下靠近出水口处土壤含水率最高,根长密度峰值较 DI 的峰值下移。ISDI 减少了地表水分蒸发,同时下移的根系有利于枣树在垂直方向上扩大吸收水分养分的范围,达到节水增产的效果。

相关研究表明,通过增加土壤深层含水率,可诱导玉米、小麦等作物根系相对较多地向土壤纵深下扎^[24-25],并有利于诱导作物形成上层相对较少、深层相对较多的根系构型。本研究结果同样表明随灌溉深度的增加,出现土壤最大含水率及最大水平湿润距离的位置均下移,使枣树根系根长密度峰值及水平方向的最大范围也下移,细根的分布从“宽浅型”向“深根型”发展。深根型延伸了根系汲取土壤水分的层次,利于充分利用土壤深层贮备水,提高了作物收获指数和水分利用效率^[26]。

研究指出深层根量的增多在土壤严重干旱时更具有重要意义,较宽浅型根系而言,深根型根系在干旱地区具有较好的适应性^[27-29]。NARAYAN^[30]指出在干旱胁迫条件下,根系的下扎深度是重要的选择指标。南疆红枣种植区地处极端干旱荒漠区,提高作物抗旱能力是保障农业生产中十分重要的技术指标之一,利用 ISDI 技术来调控根系分布,促进枣树根系下扎,对提高干旱区枣树的抗旱性有一定的作用。

综上,采用 ISDI 灌溉,通过对灌溉深度的调控,增加深层土壤根量及根系垂直分布深度,有利于提高枣树产量、水分利用率及抗旱性,本研究对干旱区枣树适宜灌溉技术的选择及其技术要素的制定具有一定的生产指导意义。

试验期间枣树尚处于幼龄期,试验表明灌溉深度对根系的分布、生长有较显著的调控作用,一些学者也在幼龄林木上研究水分调控对根系分布的影响取得一定的成果^[16]。而当果树处于成龄期时,灌溉深度对根系分布的调节效果需进一步研究。

4 结论

(1)通过对比,形态上 DI 处理根系分布较浅,细根根毛稀疏,粗根直径较大,基本呈水平分布;ISDI 处理细根、粗根和主根根系分布较均匀,生长方向基本向下。ISDI 显著增加了 $d < 5\text{ mm}$ 根系根长密度,尤其细根($d < 2\text{ mm}$)SDI 下是 DI 的 3 倍,但减少了 $d > 5\text{ mm}$ 根系根长密度;增加了 20 ~ 40 cm 土层根系根长占总根长的比率,减小了根系

在水平方向上的分布范围。

(2)在 ISDI 下随灌溉深度的增加,表层根量相对减少,深层根系根长密度相对增加;各处理根系根长密度基本呈现出随着与树干水平距离的增加而减小的趋势,但在 0 ~ 20 cm 土层减小的幅度较大,在 20 ~ 40 cm 土层其减小的幅度较小。随着灌溉技术由 DI 到 ISDI 及随着灌溉深度的增加,细根分布基本呈现出“宽浅型”向“深根型”发展的趋势。

(3)ISDI 有较好的节水增产效果,相对于 DI ($p < 0.05$)其最大提高产量为 20 %。枣树产量及水分利用率随着导水装置埋深增加而增大,导水装置埋深达到 35 cm 时节水增产效果不显著,建议幼龄期新疆密植枣树的导水装置埋深为 27 ~ 35 cm。

参 考 文 献

- LIU R X,ZHOU Z G,GUO W Q,et al. Effect of N fertilization on root development and activity of water-stressed cotton plants[J]. Agricultural Water Management,2008,95: 1261 – 1270.
- MOROKE T S,SCHWARTZ R C,BROWN K W,et al. Soil water depletion and root distribution of three dryland crops[J]. Soil Science Society of America Journal,2005,69: 197 – 205.
- 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)
- 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)
- 乔英,孙建,孙三民,等. 滴灌对塔里木灌区骏枣根系分布的影响研究[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)
- 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)
- 赵伟霞,张振华,蔡焕杰. 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. Parameter model of water-conducting device specification for indirect subsurface drip irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 355 – 363. (in Chinese)
- 孙三民,安巧霞,蔡焕杰,等. 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):160 – 169. SUN Sanmin, AN Qiaoxia, CAI Huanjie, et al. Research on salt movement law in jujube root zone under indirect subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):160 – 169. (in Chinese)
- 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. 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)
- MACHADO R M A, ROSARIO M D, OLIVEIRA G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation[J]. Plant and Soil, 2003, 255(1): 333 – 341.
- 吕谋超,冯俊杰,翟国亮. 地下滴灌夏玉米的初步试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 67 – 71. LÜ Mouchao, FENG Junjie, ZHAI Guoliang. Preliminary test of soil water influence on root system and yield of summer corn in subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(1): 67 – 71. (in Chinese)
- ZHUGE Y P, ZHANG X D, ZHANG Y L, et al. Tomato root response to subsurface drip irrigation[J]. Pedosphere, 2004, 14(2): 205 – 212.
- 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)
- 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)
- 15 韦艳葵,贾黎明,王玲,等. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林林木根系生长特性[J]. 北京林业大学学报,2007,29(2):34–40.
WEI Yankui, JIA Liming, WANG Ling, et al. Characteristics of root growth in fast-growing and high-yield poplar plantations under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007,29(2):34–40. (in Chinese)
- 16 肖元松,彭福田,张亚飞,等. 增氧栽培对桃幼树根系构型及氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(10):1995–2002.
XIAO Yuansong, PENG Futian, ZHANG Yafei, et al. Effects of aeration cultivation on root architecture and nitrogen metabolism of young peach trees [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014,47(10):1995–2002. (in Chinese)
- 17 RUIZ-SANCHEZ M C, PLANA V, FORTUNO M F, et al. Spatial root distribution of apricot trees in different soil tillage practices [J]. Plant and Soil, 2005,272(1–2):211–221.
- 18 田盼盼,董新光,姚鹏亮,等. 干旱区不同灌溉方式下早熟根系分布特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(1):102–105.
TIAN Panpan, DONG Xinguang, YAO Pengliang, et al. Research on root distribution characteristics of jujube tree under different irrigation methods in arid area[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012,23(1):102–105. (in Chinese)
- 19 郝锋珍. 蓄水坑灌果树吸水根系分布及吸水模型研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
HAO Fengzhen. Research on fine root distribution and water-uptake model of fruit trees under water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 20 郝仲勇,杨培岭,刘洪禄. 苹果树根系分布特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(6):63–66.
HAO Zhongyong, YANG Peiling, LIU Honglu. Experimental investigation on root system distribution of apple tree[J]. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(6):63–66. (in Chinese)
- 21 罗宏海,张宏芝,张亚黎,等. 干旱区膜下滴灌条件下土壤深层水对棉花根系生长、分布及产量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(2):395–402.
LUO Honghai, ZHANG Hongzhi, ZHANG Yali, et al. Effects of water storage in deeper soil layers on the root growth, root distribution and economic yield of cotton in arid area with drip irrigation under mulch[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(2):395–402. (in Chinese)
- 22 席本野. 毛白杨人工林灌溉管理理论及高效地下滴灌关键技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
XI Benye. Research on theories of irrigation management and key techniques of high efficient subsurface drip irrigation in *Populus tomentosa* plantation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)
- 23 魏国良,汪有科,王得祥,等. 梨枣人工林有效吸收根系密度分布规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010,38(1):133–138.
WEI Guoliang, WANG Youke, WANG Dexiang, et al. Study on the distribution characteristics of effective root density[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2010,38(1):133–138. (in Chinese)
- 24 BOWEN G D. Tree roots and the use of soil nutrients [M] // BOWEN G D, NAMBIAR E K S. Nutrition of plantation forests. London: Academic Press, 1984:147–177.
- 25 郭安红,刘庚山,安顺清,等. 有限供水对冬小麦根系生长发育的影响及其对底墒的利用特征[J]. 应用气象学报,2002, 13(5):621–626.
GUO Anhong, LIU Gengshan, AN Shunqing, et al. Effect of limited water supply on root growth and envelopment of winter wheat and the characters of soil moisture use before planting[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002,13(5):621–626. (in Chinese)
- 26 任三学,赵花荣,霍治国,等. 有限供水对夏玉米根系生长及底墒利用影响的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2):161–165.
REN Sanxue, ZHAO Huarong, HUO Zhiguo, et al. Study on effect limited water supply on growth of roots and soil moisture use of summer corn[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(2):161–165. (in Chinese)
- 27 王法宏,王旭清,刘素英,等. 根系分布与作物产量的关系研究进展[J]. 山东农业科学,1997(4):48–51.
WANG Fahong, WANG Xuqing, LIU Suying, et al. Research progress on the relationship between root system distribution and crop yield[J]. Journal of Shandong Agricultural Science, 1997(4):48–51. (in Chinese)
- 28 刘晓丽,汪有科,马理辉,等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报,2013,44(7):90–97,106.
LIU Xiaoli, WANG Youke, MA Lihui, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense jujube plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):90–97,106. (in Chinese)
- 29 卫新东,汪星,汪有科,等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):88–97.
WEI Xindong, WANG Xing, WANG Youke, et al. Root distribution and water dynamics of jujube plantations in loess hilly regions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):88–97. (in Chinese)
- 30 NARAYAN D. Root growth and productivity of wheat cultivals under different soil moisture condition[J]. International Journal of Ecology and Environmental Sciences, 1991,17(1):19–26.