

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.021

蓄水坑灌下矮砧苹果园水分监测点位置研究*

郑利剑¹ 马娟娟¹ 郭飞¹ 任荣¹ 郭向红¹ 孙西欢^{1,2}

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西水利职业技术学院, 运城 044004)

摘要: 以蓄水坑灌(坑深40 cm)下的5 a生矮砧富士苹果树为研究对象,通过田间测定直径小于等于2 mm的吸水根分布和不同位置的土壤含水率情况,采用数据拟合和聚类分析的方法,探讨蓄水坑灌下矮砧苹果树土壤水分监测点的合理布置。结果表明:①蓄水坑灌下,苹果树吸水根在水平方向上主要分布于距树干0~90 cm范围内,其根长密度占总根系的90%以上;垂直深度上主要分布于距地表0~120 cm深度范围内,其根长密度占总根系的80%以上,并在40~60 cm深度达到生长峰值,其根长密度占总根系的40%以上。②以D₉₀(距离树干90 cm,深度0~120 cm)监测点为含水率分析区域,通过水分分布曲线拟合和聚类分析得出,D₉₀监测点60 cm深度处的含水率可代表整个0~120 cm深度剖面的含水率情况,并利用2013年的实测数据进行验证,含水率相对误差在±5%范围内。

关键词: 蓄水坑灌 土壤含水率 根系分布

中图分类号: S275.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0160-07

Monitoring Locations of Soil Water Content in Water Storage Pit Irrigated Dwarfing Apple Tree Orchard

Zheng Lijian¹ Ma Juanjuan¹ Guo Fei¹ Ren Rong¹ Guo Xianghong¹ Sun Xihuan^{1,2}

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng 044004, China)

Abstract: Soil water content (SWC) is of great importance to establish an appropriate irrigation scheme. The study object is 5-year-old dwarf apple trees under water storage pit irrigation method (depth 40 cm). In order to find an optimal SWC monitoring location, the distribution of apple tree fine roots ($d \leq 2$ mm) at different locations and SWCs within the root zone were studied and analyzed with regression and cluster analysis methods. The results showed that over 90% fine roots of apple tree were within 0~90 cm from the apple tree trunk in horizontal direction, while over 80% fine roots were within 0~120 cm from the apple tree trunk in vertical direction. The growth peak of fine roots was within 40~60 cm depth which accounted for over 40% of total fine roots. Meanwhile, the monitoring points were located at 90 cm away from the trunk (D₉₀). SWC distribution in vertical direction of the D₉₀ monitoring points was accorded with exponential function, with correlation coefficient greater than 0.8. Through sorting the SWC at six different depths in D₉₀ with R type hierarchical clustering method, it showed that the soil moisture sensors in 60 cm can be used to represent the SWC condition within 0~120 cm depth. The SWC error between the simulations and observations in 2013 was within ±5%. The experimental results suggested that the profile (depth 60 cm) of SWC measured in the D₉₀ was sufficient to estimate the water consumption amount under the water storage pit irrigation in the orchard.

Key words: Water storage pit irrigation Soil water content Root distribution

收稿日期: 2014-12-25 修回日期: 2015-01-27

* 国家自然科学基金资助项目(51109154, 51249002, 51579168)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111402120006、20121402110009)和山西省科技攻关资助项目(20110311018-1, 20140311016-6)

作者简介: 郑利剑, 博士生, 主要从事节水灌溉研究, E-mail: 984106887@qq.com

通讯作者: 马娟娟, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: mjjxsxy@163.com

引言

蓄水坑灌法是一种适用于果树的中深层灌溉方法。与其他灌溉方法相比,其坑壁环形入渗、坑底隔水的特点使单坑土壤湿润体呈半椭球型^[1],相邻两坑间存在干扰入渗而形成零通量面^[2]。土壤湿润体的体积受土壤理化性质、坑深、坑距、灌水量、施肥量等因素的影响,准确掌握土壤湿润体内的水分情况,是研究水肥运移和灌溉施肥精准管理的前提。

在我国北方,以 SH 系苹果矮化砧木为主的矮砧果树发展迅速^[3]。在此类果园中,蓄水坑灌下土壤湿润体的水分情况,常以距树干 30 cm 到树冠外围、深度 2 m、分过坑和不过坑^[4]的扇形分布为监测范围。然而,随着蓄水坑灌法的逐步推广,对水分的监测将从研究分布规律向日常管理转变。相对密集的测点,虽能准确反映蓄水坑灌下单株果树土壤水分的运移,但增加了监测难度和强度,并对果树的生长带来了一定影响。如果取样点数目太少,代表性又不足。因而,有必要对蓄水坑灌下矮砧苹果树的水分监测点位置进行研究,寻求恰当的监测土壤湿润体范围内水分情况的方法。

目前,关于土壤水分监测点的研究,大多集中在以滴灌为主的大田作物,通过干燥称量法和埋设水分传感器等手段,分析不同测点分布^[5-6]、不同深度^[7]范围内土壤含水率之间的相关性^[8-9],并考虑

土壤空间变异性^[10-11]以确定水分监测的适宜位置。而利用管式水分传感器等新技术^[12-13],并结合植物耗水^[12]、根系生长^[14-15]等生长发育状况对果树土壤水分监测点的研究相对较少。因此,本文利用管式 TDR 测定蓄水坑灌下 5 a 生矮砧苹果树土壤计划湿润层的水分情况,而果树根系特别是吸水根的分布对确定土壤计划湿润层有重要意义^[16-17]。根据蓄水坑灌下直径 $d \leq 2$ mm 吸水根^[18]的分布特征并结合水分分布曲线规律,探讨土壤水分监测点的合理位置,为制定灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西省农科院果树研究所矮化苹果园内进行,该果园位于东经 112°32′,北纬 37°23′的太谷县西南部,平均海拔高度 781.9 m,年平均气温为 9.8℃,无霜期达 175 d,多年平均降水量约 460 mm,属典型的暖温带季风影响下的大陆性半干旱气候。

根据我国土壤质地分类标准,0~200 cm 深度范围内土壤机械组成如表 1 所示,土壤以壤土为主,土壤容重平均为 1.47 g/cm³,田间持水率平均为 24.7%(体积含水率)。0~40 cm 范围内土壤肥力状况为:pH 值 8.01,全氮质量比 0.781 8 g/kg,全磷质量比 0.573 g/kg,全钾质量比 20.93 g/kg,有机质质量比 8.69 g/kg。

表 1 土壤机械组成
Tab.1 Soil texture composition

土壤深度/cm	黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%			砂粒质量分数/%		质地
	(0~0.002 mm)	(0.002~0.02 mm)	(0.02~0.05 mm)		(0.05~0.25 mm)	(0.25~2 mm)	
0~30	16.12	27.11	25.25		29.24	2.28	壤土
30~70	14.28	23.90	32.32		28.73	0.77	
70~120	14.89	17.23	34.74		32.15	0.99	
120~170	13.13	12.32	36.18		37.61	0.76	
170~200	11.24	8.65	39.94		39.08	1.09	

1.2 果树种植情况

试验对象 5 a 生苹果树(初果期)为 3 段砧木矮化红富士丹霞,底部为海棠砧木,中间砧为 SH 系,上部嫁接红富士丹霞苹果,中间砧长度约 20 cm,入土深度约 10 cm。试验果树采用蓄水坑灌灌溉(坑深 40 cm),试验期内(3—10 月份)分别在果树开花期(4 月 15 日)、幼果期(5 月 23 日)和膨大期(7 月 20 日)进行灌水,每次灌水量为 200 L/株;其余日常管理与当地果园情况一致。

1.3 根系取样及分析

为确定土壤含水率分析范围,在埋设 TRIME-PICO-IPH 管式 TDR 含水率监测管前,对果树吸水

根进行取样分析。本次试验选用生长良好、长势相近并已经实施蓄水坑灌(坑深为 40 cm)的 3 株果树进行研究。

由于果树为 5 a 生,树龄较小,根系分布相对较浅,因此采用根钻法(根钻直径为 70 mm)^[19]对苹果树根系进行取样。根据果树吸水根($d \leq 2$ mm)^[18]一年内一般存在 2 次生长高峰^[20],一次在 7—8 月份、一次在 12 月一次年 1 月份,并考虑到尽量不影响果树生长,故取根时间为 2 次生长高峰后,即在 2013 年 9 月份和 2014 年 3 月份(考虑冻土)。取样点布置在两坑中线处,分别距离树干 30、60、90、120 cm,记为 D_p30、D_p60、D_p90、D_p120(图 1)。

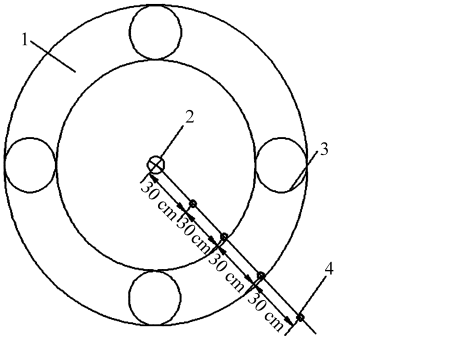


图1 根系调查取样和含水率监测布置点示意图
Fig.1 Root survey sampling scheme and moisture monitoring points

1. 环状沟 2. 苹果树 3. 蓄水坑 4. 根系取样点和含水率监测点

从地表算起,每20 cm深度为一层钻取土样,直至200 cm深度。将取出的带有根系的土样用密封袋装好并标记,带回实验室后置于40目的筛子中用清水冲洗分离,然后分拣、干燥^[18]。将分离出的根系,用镊子平铺于尺寸为20 cm×25 cm的有机玻璃皿中(根系与根系之间不能重叠),用扫描仪(Epson Perfection 4870型)对根系进行扫描,再用WinRHIZO根系分析软件(Regent Instruments Company, Canada)对扫描结果进行分析,并计算吸水根(直径 $d\leq 2\text{ mm}$)的根长密度,即

$$RD_L = L_R / V_S \tag{1}$$

式中 RD_L ——根长密度, cm/cm^3

L_R ——根系长度, cm

V_S ——土壤体积, cm^3

1.4 土壤含水率监测

3棵果树根区土壤含水率监测点的布置在径向上与根系取样点一致,为距离树干30、60、90、120 cm共4个点,即为 D_r30 、 D_r60 、 D_r90 、 D_r120 (图1)。用TRIME-PICO-IPH管式TDR(Time domain reflectometry)测定各测点土壤剖面深度为200 cm的土壤含水率(干燥法校准)。测定时间为09:00,从2014年3月起,平均每隔10 d测定一次,并在灌水前、后及降水后进行加测,直至果树采收后结束。

1.5 数据分析

用Microsoft Office Excel 2013对所得根系和含水率数据进行处理,用SPSS 19.0进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 根据果树吸水根分布特征确定监测范围

图2为蓄水坑灌下果树吸水根分布,蓄水坑灌下果树吸水根(直径 $d\leq 2\text{ mm}$)在测点 D_r30 和 D_r60 处的整体分布较 D_r90 和 D_r120 处多。在径向上,吸水根主要分布在测点 D_r30 和 D_r60 之内。在垂向深

度上,吸水根生长主要分布在0~120 cm,生长峰值出现在40~60 cm,在80~140 cm根系生长变化较弱,140 cm~200 cm变幅最小,这与郝锋珍等^[21]的研究结果一致,而与任雪菲等^[22]认为矮化苹果细根主要分布在0~40 cm土层的结果不同。这是由于蓄水坑灌坑深40 cm,其水分分布在径向上表现为靠近树干一侧的土壤水分增量相对较大,垂向土壤水分增量的最大值在40~80 cm深度,在40~140 cm范围内均是水分增量的高值区^[4],加之布置于距离树干60 cm处的蓄水坑起到改善附近土壤通气性的作用^[23],使得在以树干为中心的径向60 cm、深度20~80 cm土壤范围内,形成了适合果树吸水根生长的微生态区。

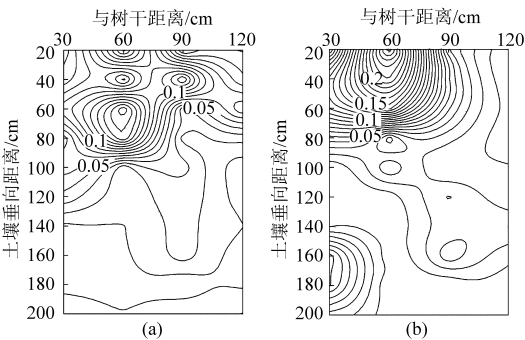


图2 蓄水坑灌下果树吸水根系分布
Fig.2 Distribution of fine roots length density of water storage pit irrigated apple tree
(a) 9月第1次取根 (b) 次年3月第2次取根

由图2可知,2次取根样中,取样点 D_r60 的表层20 cm处吸水根分布较其他3个取样点更为密集(约占20 cm深度总根长密度的70%以上),这是由于该取样点位于环状沟附近,而环状沟具有截留雨水、输送水肥等作用(类似于垄膜),这样使得环状沟附近的水、肥、气、热状况较佳,吸水根趋向环状沟生长^[24];而取样点 D_r90 虽同样位于环状沟附近,但由于其距离树干较远,因而吸水根生长并不显著。

取样点 D_r60 和 D_r90 处的中深层(相对200 cm深度而言)吸水根生长分布较其他2个测点更为均匀。由于这2个取样点位于蓄水多坑干扰入渗区域,而在干扰入渗条件下在相邻两坑的中间位置会形成零通量面。在该零通量面上,水分垂向扩散且分布会更均匀。

由表2可知,次年3月份第2次取根根系主要生长范围较9月份稍有上移,这可能与苹果采收后对坑口进行秸秆覆盖有关。因其对果园土壤温度^[25]、水分和养分^[26]产生影响,进而影响了果树生长^[27]。且果树在根系第2次生长高峰时,除主要集中于20~60 cm深度,在160~180 cm深度也出现了较大增量,这表明经过蓄水坑灌溉后,果树根系深

扎的趋势明显。

表 2 果树垂向吸水根分布
Tab.2 Vertical distribution of fine roots length
density of apple tree

土层 深度/ cm	9 月份第 1 次取根			次年 3 月份第 2 次取根		
	根长	占总根长	累积根	根长	占总根长	累积根
	密度/ 密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/	密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/	密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/
20	0.235 0	16.20	16.20	0.365 9	22.71	22.71
40	0.271 2	18.69	34.89	0.406 5	25.23	47.94
60	0.345 2	23.80	58.69	0.334 0	20.73	68.67
80	0.224 4	15.47	74.16	0.078 6	4.88	73.55
100	0.105 6	7.28	81.44	0.063 8	3.96	77.51
120	0.085 5	5.90	87.34	0.048 0	2.98	80.49
140	0.050 1	3.45	90.97	0.066 9	4.15	84.64
160	0.041 4	2.85	93.64	0.128 8	7.99	92.63
180	0.027 0	1.86	95.50	0.078 0	4.84	97.47
200	0.065 1	4.50	100	0.040 7	2.53	100

由表 2 和表 3 可知,2 次取根样,果树吸水根整体均表现为:根系主要分布在 0~120 cm 土层,根长密度分别占总根系的 87.34% 和 80.49%,且更为集中于 40~60 cm 深度范围内,其根长密度分别占总根系的 42.29% 和 45.69%。在距树干水平距离内,根系主要分布在 0~90 cm 范围内,其根长密度分别占总根系的 92.83% 和 94.38%,并以距离树干 60 cm 处的根系分布最广,其根长密度占 40% 左右。

表 3 果树径向吸水根分布
Tab.3 Radial distribution of fine roots length
density of apple tree

距树干 位置/ cm	9 月份第 1 次取根			次年 3 月份第 2 次取根		
	根长	占总根长	累积根	根长	占总根长	累积根
	密度/ 密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/	密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/	密度/的百 长百分 (cm·cm ⁻³) 分数/% 数/%	密度/
30	0.567 9	39.67	39.67	0.520 3	32.29	32.29
60	0.551 6	38.53	78.19	0.716 5	44.47	76.76
90	0.209 6	14.64	92.83	0.283 9	17.62	94.38
120	0.102 6	7.17	100	0.090 5	5.62	100

因此,根据吸水根以径向 0~90 cm,垂向 0~120 cm 为主要分布区,并在 D_r60 测点处分布最广,而 D_r60 和 D_r90 测点位于两坑干扰入渗的对称区域,理想条件下两测点的水分分布应一致,同时考虑到 TDR 的径向监测范围(15 cm)以及避免埋设测管对果树根系生长的影响,故选择土壤含水率监测点 D_r90(距树干 90 cm 处,深度 0~120 cm)的含水率数据来反映根区水分状况。

2.2 根据土壤水分分布拟合曲线确定监测点深度

采用式(2)的指数函数^[4],对 2014 年 D_r90 剖面深度 0~200 cm 以内的土壤体积含水率数据进行

拟合,拟合结果见表 4。

$$\theta = \frac{1}{100} \alpha e^{b|z-c|} \times 100\%$$

(2)

式中 θ ——土壤体积含水率,%
 z ——土层深度,cm
 α 、 b 、 c ——参数

表 4 垂向含水率拟合参数值
Tab.4 Fitting parameter values of soil water
content in vertical direction

观测日期	α	b	c	r
4 月 26 日	31.06	-0.003 738	130.9	0.928 8
5 月 21 日	30.50	-0.005 057	154.3	0.943 6
6 月 12 日	27.86	-0.005 697	168.2	0.972 2
7 月 21 日	25.44	-0.002 537	186.1	0.960 3
8 月 1 日	27.69	-0.002 799	131.8	0.930 0
9 月 4 日	25.66	-0.002 870	174.6	0.975 8
10 月 15 日	27.48	-0.003 036	122.9	0.862 2

注: r 为相关系数。

由表 4 可知,相关系数均在 0.8 以上,说明监测点 D_r90 处土壤含水率在垂向的分布符合式(2)的指数函数。

求解 $z=0\sim120$ cm 范围内的平均土壤含水率 $\bar{\theta}$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{12\,000} \int_0^{120} \alpha e^{b|z-c|} \times 100\%$$

(3)

式中 $\bar{\theta}$ ——平均土壤体积含水率,%

用式(2)反求对应深度 z ,结果见图 3。

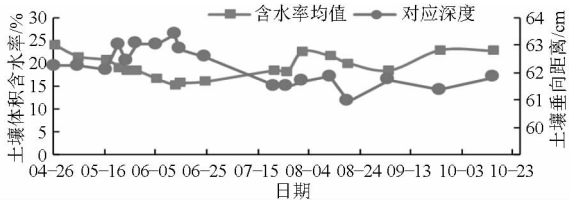


图 3 土壤体积含水率和深度分布

Fig.3 Distribution of soil volume water content and soil depth

由图 3 可知,0~120 cm 的土壤含水率均值 $\bar{\theta}$ 基本维持在 15%~25%,在田间持水率的 60% 以上;对应的深度 z 为 61~63 cm。结果表明,测点 D_r90 的 60 cm 深度的监测数据可代表整个 0~120 cm 深度范围内的土壤含水率情况。

2.3 根据土壤实测值分析确定监测点深度

根据 2014 年实测的矮砧苹果树生育期内的土壤含水率数据,分析监测点 D_r90 处不同深度的土壤体积含水率的相关关系(表 5)。

由表 5 可知,各深度土壤含水率之间存在一定的相关关系,除 20 cm 外,其他土层间相关系数均大于 0.4。这是由于果树表层土壤状况较为复杂。相邻两层间土壤含水率的相关关系较大,均在 0.7 以上。其中,深度 100 cm 和 80 cm 相关性最高,深度

表 5 不同深度土壤体积含水率相关系数
Tab.5 Correlation coefficients of soil water contents at different depths

土壤深度/cm	土壤深度/cm					
	20	40	60	80	100	120
20	1					
40	0.812 4	1				
60	0.350 3	0.742 9	1			
80	0.099 0	0.550 8	0.824 1	1		
100	0.048 7	0.493 0	0.785 5	0.978 6	1	
120	0.016 1	0.458 6	0.845 1	0.902 4	0.894 2	1

60 cm 与其他土层的相关性均较高,深度 20 cm 除与 40 cm 相关性较高外,与其他土层间的相关性并不明显。

利用相关分析所得出的结果,将 0 ~ 120 cm 深度划分为 6 个土层,利用 R 聚类分析对其进行分类。R 型聚类分析的原理是先认为各变量自成一类,然后把最相似(指距离最小或相关系数最大)的变量聚成一个小类,将聚合的小类按其相似性再次聚合,随着相似性的减弱,最后将一切子类都聚合成一个大类,从而得到一个按相似性大小聚结起来的谱系图。本文利用欧氏距离公式计算聚类距离,聚类方法选最短距离法,利用 R 型聚类分析监测点 D_r90 的土壤含水率数据,结果见图 4。

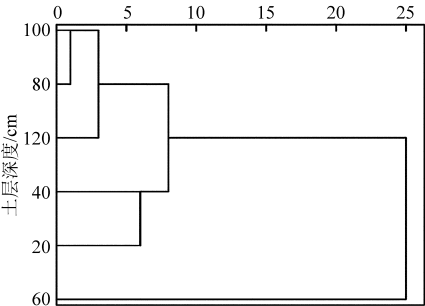


图 4 不同层次土壤含水率聚类谱系图
Fig.4 Soil moisture polymerization pedigree at different depths

由图 4 可知,如果将 D_r90 中 0 ~ 120 cm 深度的各层土壤水分状况分为 2 类,60 cm 和其余的土层就是两大类;分为 3 类时,20 ~ 40 cm 代表浅层土壤含水率情况,60 cm 代表中层土壤含水率情况,80 ~ 120 cm 代表深层土壤含水率情况;以此类推,分类数目越大,归类越详细。

根据表 5 和图 4 的分析结果,可利用 D_r90 测点 60 cm 深度处的土壤含水率表征 0 ~ 120 cm 整体的土壤含水率情况。

2.4 结果验证

利用 2013 年对该试验地同一批长势相同、坑深 40 cm 的苹果树测定(分过坑与不过坑,距离树干每

隔 30 cm 布置一个测点,共 8 个测点)的土壤含水率数据^[4],对 D_r90 测点 60 cm 深度处的土壤含水率表征 0 ~ 120 cm 深度的土壤含水率的结论进行验证分析,结果见表 6。

表 6 计算和观测的土壤含水率对比
Tab.6 Comparison of computed and measured soil volume water content %

日期	距树干 90 cm 测点 60 cm 深度处体积 含水率	距离树干 8 个测点 0 ~ 120 cm 深度体积 含水率均值	相对 误差
5 月 24 日	21.01	22.06	4.76
5 月 28 日	29.20	28.10	-3.91
6 月 4 日	20.07	20.39	1.57
6 月 24 日	27.76	27.92	0.57
7 月 19 日	30.65	31.12	1.54
8 月 12 日	27.54	27.41	-0.13
9 月 10 日	30.62	30.17	-1.49
9 月 12 日	31.28	30.11	-1.17
9 月 16 日	30.68	33.36	3.88
9 月 26 日	32.98	32.64	-1.04
10 月 10 日	31.12	32.02	2.81
10 月 26 日	32.34	32.64	0.92

从表 6 中可知,将 D_r90 测点 60 cm 深度的土壤含水率值与 8 个测点 0 ~ 120 cm 深度土壤含水率的均值比较,两者结果较为接近,相对误差基本在 ±5% 以内,满足要求。因此,可以将 D_r90 测点 60 cm 深度作为表征蓄水坑灌下 5 a 生矮砧苹果树根区水分情况的监测点。

3 结论

(1)在蓄水坑灌(坑深 40 cm)下,5 a 生矮砧苹果树的 2 次生长高峰后,苹果树吸水根在水平方向上主要分布在距树干 0 ~ 90 cm 范围内,其根长密度占总根系的 90% 以上;垂直深度主要分布在 0 ~ 120 cm,其根长密度占总根系的 80% 以上,并在深度 40 ~ 60 cm 达到生长峰值,其根长密度占总根系的 40% 以上。

(2)根据吸水根生长范围,选择距离树干 90 cm、0 ~ 120 cm 深度的 D_r90 测点作为果树含水率测定范围,土壤含水率垂向分布呈指数函数,其相关系数在 0.8 以上。

(3)利用曲线积分和聚类分析得出,D_r90 测点 60 cm 深度的土壤含水率可以表征 D_r90 测点剖面 0 ~ 120 cm 的平均含水率,并用 2013 年实测 D_r90 测点 60 cm 深度的含水率数据与 8 个测点的数据进行验证,相对误差不超过 ±5%。表明在蓄水坑灌下 5 a 生矮砧苹果树的水分监测点可以仅布置在 D_r90 测点 60 cm 深度处,达到监测根区土壤含水率变化情况的目标,减小了监测范围。

参 考 文 献

- 1 李京玲,孙西欢,马娟娟,等. 蓄水坑灌单坑土壤水分运动模型的有限体积法求解[J]. 农业机械学报,2011,42(5):63–67.
Li Jingling, Sun Xihuan, Ma Juanjuan, et al. Numerical simulation for single pit soil water movement of water storage pit irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):63–67. (in Chinese)
- 2 马娟娟,孙西欢,郭向红,等. 蓄水多坑入渗条件下土壤水分运动建模与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):46–51.
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation on soil water movement under water storage pits irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):46–51. (in Chinese)
- 3 高敬东,王骞,蔡华成,等. SH 系矮砧苹果园节水灌溉比较[J]. 中国农学通报,2014,30(22):186–190.
Gao Jingdong, Wang Qian, Cai Huacheng, et al. Comparison on water-saving irrigation in dwarf rootstock orchard with SH series apple[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(22):186–190. (in Chinese)
- 4 崔世勇,孙西欢,郭向红,等. 蓄水坑灌不同坑深条件下土壤水分分布特征分析[J]. 节水灌溉,2014(5):14–17.
Cui Shiyong, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Analysis of characteristics of soil moisture distribution under water storage pit irrigation with different pit depth[J]. Water Saving Irrigation, 2014(5):14–17. (in Chinese)
- 5 Ferreyra R A, Apezteguia H P, Sereno R, et al. Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing[J]. Geoderma, 2002, 110(3):265–289.
- 6 Nunzio Romano. Soil moisture at local scale: measurements and simulations [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 6–20.
- 7 Adelakun I A, Ranjan R Sri. Design of a multilevel TDR probe for measuring soil water content at different depths [J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(4):1451–1460.
- 8 杨绍辉,王一鸣,孙凯. 基于土壤含水率垂向变化规律的水分传感器布设[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5):104–107.
Yang Shaohui, Wang Yiming, Sun Kai. Soil moisture content sensors placement based on the vertical variety law[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):104–107. (in Chinese)
- 9 申孝军,孙景生,张寄阳,等. 滴灌棉田土壤水分测点最优布设研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3):90–95.
Shen Xiaojun, Sun Jingsheng, Zhang Jiyang, et al. Study on the placement of sensors for moisture content in soil profile for cotton under mulched drip irrigation condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 90–95. (in Chinese)
- 10 Teuling A J, Uijlenhoet R, Hupet F, et al. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(5):755–767.
- 11 Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489:148–159.
- 12 赵伟霞,李久生,王珍,等. 土壤含水率监测位置对温室滴灌番茄耗水量估算的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1):37–43.
Zhao Weixia, Li Jiusheng, Wang Zhen, et al. Estimation of water consumption as affected by measurement locations of soil water content in drip irrigated tomato in solar greenhouses[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(1):37–43. (in Chinese)
- 13 张智韬,李援农,杨江涛,等. 遥感监测土壤含水率模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8):152–156.
Zhang Zhitao, Li Yuannong, Yang Jiangtao, et al. Model for monitoring soil moisture using remote sensing and its accuracy analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):152–156. (in Chinese)
- 14 孟秦倩,王健,吴发启,等. 黄土山地苹果园土壤水分最大利用深度分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):65–71.
Meng Qinqian, Wang Jian, Wu Faqi, et al. Soil moisture utilization depth of apple orchard in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):65–71. (in Chinese)
- 15 胡永翔,李援农,张莹,等. 基于水分胁迫系数的枣树园土壤含水率估算[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3):270–276.
Hu Yongxiang, Li Yuannong, Zhang Ying, et al. Estimation of soil moisture content of jujube orchard in loess plateau based on water stress coefficient from FAO–56[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3):270–276. (in Chinese)
- 16 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.
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. (in Chinese)
- 17 蒯斌. 蓄水坑灌条件下苹果树根系吸水模型试验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2008.
Kuai Bin. Experimental research of fruit tree root water uptake model on the condition of water storage pit irrigation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 18 郝仲勇,杨培岭,刘洪禄,等. 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, et al. Experimental investigation on root system distribution of apple tree[J]. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(6):63–66. (in Chinese)
- 19 孙力安,刘国彬,梁一民. 不同直径土钻测定草地地下生物量方法探讨[J]. 中国草地, 1994(2):32–35.
Sun Li'an, Liu Guobin, Liang Yimin. Studies on determining methods of underground biomass with different diameter coting [J]. Grassland of China, 1994(2):32–35 (in Chinese)

- 20 马玉芳,王洪起,宋红梅,等. 红富士苹果幼树根系分布及年生长特性研究[J]. 中国果树,1993(3):1-4.
- 21 郝锋珍,孙西欢,郭向红,等. 蓄水坑灌与地面灌条件下果树吸水根系分布的对比研究[J]. 节水灌溉,2014(9):5-8.
Hao Fengzhen, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Comparative research on fruit tree water-uptake root distribution under the condition of water storage pit irrigation and surface irrigation[J]. Water Saving Irrigation,2014(9):5-8. (in Chinese)
- 22 任雪菲,李丙智,张林森,等. 苹果中间砧入土深度对根系生长及其激素含量和果实产量品质的影响[J]. 园艺学报,2013,40(11):2127-2136.
Ren Xuefei, Li Bingzhi, Zhang Linsen, et al. Effects of planting depth of apple dwarfing rootstock on root growth, hormone content, fruit yields and quality[J]. Acta Horticulturae Sinica,2013,40(11):2127-2136. (in Chinese)
- 23 张文锦,马娟娟,孙西欢,等. 蓄水坑灌条件下不同肥液浓度对果园土壤呼吸影响及水热关系分析[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线[2014-12-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201412-887>.
Zhang Wenjin, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Effects of different levels of fertilizer solution concentration on the orchard soil respiration and the analysis of soil temperature and moisture under water storage pit irrigation [EB/OL] Beijing: Science paper online, [2014-12-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201412-887>. (in Chinese)
- 24 孙文泰,张坤,刘小勇,等. 垄膜集雨对陇东旱塬苹果根系分布及土壤性状的影响[J]. 西北农业学报,2012,21(10):100-105.
Sun Wentai, Zhang Kun, Liu Xiaoyong, et al. Influence of plastic film mulching on ridge and rain harvesting on root distribution characteristics of apples and soil properties in dryland orchards of Longdong areas [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2012,21(10):100-105. (in Chinese)
- 25 张亚琼,孙西欢,郭向红,等. 不同覆盖方式下蓄水坑土壤温度日变化特征研究[J]. 节水灌溉,2013(1):1-5.
Zhang Yaqiong, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Daily variation of soil temperature in water storage pit under different covering means[J] Water Saving Irrigation,2013(1):1-5. (in Chinese)
- 26 高茂盛,温晓霞,黄灵丹,等. 耕作和秸秆覆盖对苹果园土壤水分及养分的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(4):547-555.
Gao Maosheng, Wen Xiaoxia, Huang Lingdan, et al. The effect of tillage and mulching on apple orchard soil moisture and soil fertility[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(4):547-555. (in Chinese)
- 27 员学锋,吴普特,汪有科. 秸秆覆盖桃树地生态效应及桃树的生长状况[J]. 农业工程学报,2007,23(1):91-94.
Yun Xuefeng, Wu Pute, Wang Youke. Physiological and ecological conditions of peach under the straw mulching treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(1):91-94. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 143 页)

- 13 吴明隆. 结构方程模型: AMOS 的操作与应用[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009.
- 14 马玉华. 田间试验和统计方法[M]. 北京:中国农业出版社,1979.
- 15 陆景淮,李秉柏,吴金栋,等. 旱涝灾害对江苏棉花生产影响初探Ⅱ. 江苏棉花生产旱涝灾害分区评述[J]. 中国农业气象,1997,18(6):51-52.
- 16 Sojka R, Stolzy L. Soil-oxygen effects on stomatal response[J]. Soil Science, 1980,130(6):350-358.
- 17 钱龙,王修贵,罗文兵,等. 涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(16):92-101.
Qian Long, Wang Xiugui, Luo Wenbing, et al. Experimental study on Morgan model under waterlogging stress[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):92-101. (in Chinese)
- 18 Sieben W H. Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder [M]. The Netherlands: Van Zee Tot Land, 1964.
- 19 程伦国,王修贵,朱建强,等. 多过程连续涝渍胁迫对棉花产量的影响[J]. 中国农村水利水电,2006(8):59-61.
Cheng Lunguo, Wang Xiugui, Zhu Jianqiang, et al. Influences of multistage successive waterlogging on cotton yeild[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(8):59-61. (in Chinese)
- 20 朱建强,欧光华,张文英,等. 涝渍相随对棉花产量与品质的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(9):1050-1056.
Zhu Jianqiang, Ou Guanghua, Zhang Wenying, et al. Influence of subsurface waterlogging followed by surface waterlogging on yield and quality of cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica,2003,36(9):1050-1056. (in Chinese)
- 21 沈荣开,王修贵,张瑜芳,等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报,1999(3):72-75.
Shen Rongkai, Wang Xiugui, Zhang Yufang, et al. A study on the drainage index for combined control of surface and subsurface waterlogging[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999(3):72-75. (in Chinese)