覆膜集雨渗灌系统在半干旱区土壤水分监测中的应用

冯 娜[1], 张维江[1,2,3], 李 娟[1,2,3], 马 芳[1],
姜瑞洋[1], 李伟建[1], 黄 艳[1], 丁 广[1], 姜茂付[1], 王旭东[1]

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘 要: [目的] 对半干旱区覆膜集雨渗灌系统下土壤水分空间分布状况及代表性样点的确定进行分析, 为半干旱区果园水分管理提供了科学支撑。[方法] 以宁夏回族自治区固原市原州区彭堡镇覆膜集雨渗灌系统下的 4 a 生红梅杏树为研究对象, 在分析土壤水分分布特征和时间稳定性的基础上, 利用数学统计方法确定出可以代表果树周围土壤剖面含水量的测点, 构建各监测点土壤水含量与代表样点间的关系并进行检验, 在保证一定精度的条件下减少监测点数量和成本。[结果] ①土壤含水量的垂向和径向分布特征基本一致, 水分含量随着土层深度和径距的增加先增大后减小; 垂向土壤水分的变异系数由率先入渗点 30 cm处往上逐渐减小, 往下先增大后减小; 径向土壤水分的变异系数离渗灌器越远越小; ②通过时间稳定性选出湿润区的代表样点, 再通过相关性分析和聚类分析代表样点所在垂向各测点之间的关系得出, 其中 3 个监测点的土壤含水量可以代表整个 0—60 cm 深度剖面的含水量情况, 并利用实测数据进行验证, 其含水量误差在±5%。[结论] 土壤含水量在各方向的分布特征基本一致, 可以确定 3 个代表性监测点为整个 0—60 cm 深度剖面的代表性样点。

关键词: 覆膜集雨渗灌; 监测点; 土壤含水量; 空间预测; 红梅杏

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)06-0187-06 **中图分类号**: P332.1, TV213.9

文献参数: 冯娜, 张维江, 李娟, 等. 覆膜集雨渗灌系统在半干旱区土壤水分监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 187-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.027; Feng Na, Zhang Weijiang, Li Juan, et al. Aplication of irrigation system with plastic film mulching on soil moisture monitor in semi-arid area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 187-192.

Aplication of Irrigation System with Plastic Film Mulching on Soil Moisture Monitor in Semi-arid Area

Feng Na[1], Zhang Weijiang[1,2,3], Li Juan[1,2,3], Ma Fang[1], Jiang Ruiyang[1],
Li Weijian[1], Huang Yan[1], Ding Guang[1], Jiang Maofu[1], Wang Xudong[1]

(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2. *Engineering Technique Research Center for Water Saving Irrigation and Water Resources in Ningxia, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 3. *Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of soil moisture and the determination of representative sample points under the infiltration irrigation system of plastic film mulching in semi-arid area was studied in order to provide scientific support for orchard water management in semi-arid area. [Methods] Taking the 4-year-old red plum apricot trees under the infiltration irrigation system of mulching rainwater in Pengbao Town, Yuanzhou District, Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region as the research objects, based on the analysis of soil water distribution characteristics and time stability, the measuring points which could represent the soil profile moisture content around fruit trees were determined by mathematical statistics method, and the

收稿日期: 2020-07-08 **修回日期**: 2020-07-27

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目"宁南山区生态恢复与水资源潜力开发研究与示范"(2018BEG02010)

第一作者: 冯娜(1994—), 女(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源调控理论与技术。Email: 1090231048@qq.com。

通讯作者: 张维江(1963—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱地区水资源调控及水土保持等方面的研究。Email: zwjiang@263.net。

relationship between soil water content and representative sampling points were constructed in order to reduce the number and cost of monitoring points. [Results] ① The vertical and radial distribution characteristics of soil moisture were basically the same, the water content first increased and then decreased with the increase of soil depth and diameter distance. The variation coefficient of vertical soil moisture gradually decreased from 30 cm of the first infiltration point to the top, then increased and then decreased. The farther the radial soil moisture was from the infiltration irrigation device, the smaller the variation coefficient was. ② Through time stability, one sample was selected as the representative sample point in humid area. Trough the correlation and cluster analysis of the relationship between the vertical measurement points where the sample was located, it was concluded that the soil moisture content of the 3 representive monitoring points can represent the water content of the whole 0—60 cm depth profile. And verified by the measured data, the water content error was within ±5%. [Conclusion] The distribution characteristics of soil water content in all directions are basically the same. The 3 monitoring points are representative samples of the whole 0—60 cm depth profile.

Keywords: film covered rainwater collection and infiltration irrigation; monitoring point; soil moisture content; spatial prediction; red plum and apricot

土壤水分是植物所需水分的重要来源，是土壤的重要参数之一，土壤水分的含量[1]及变化关系到整个植物的生长及果实的发育，对土壤水分各个特性的研究为模拟土壤水分分布等其他领域提供了基础信息。随着科技的不断发展与进步，土壤水分的监测手段更加智能化、自动化[2]。国内外许多专家学者基于土壤水分空间变异性[3-4]和时间稳定性[5-6]等各种方法对不同灌溉方式和不同农作物的土壤水分监测点数量[7]、位置[8]、布设方法[9]进行了广泛研究，对区域土壤水分监测点的布设提供了宝贵的理论依据。起垄覆膜[10]集雨渗灌技术针对半干旱、干旱地区无效降水[11]无法到达作物根系、蒸渗损失大、降水有效利用率低等特点，通过覆膜集流渗灌对作物实施根系区域补水，提高作物土壤水分利用效率[12]。目前对于起垄覆膜集雨渗灌技术下的土壤水分监测点的布设研究较少，本文以宁夏回族自治区固原市原州区彭堡镇红梅杏经济林为研究对象，监测其不同位置的土壤含水量情况，研究其土壤含水量的时空[13]分布特征，并基于时间稳定性选取合理代表监测点[14]，构建各监测点土壤水与代表样点间的关系。在保证一定精度的条件下，用少量监测点来反映红梅杏根区土壤含水量的概况，降低土壤水分传感器成本，为半干旱区果园水分管理提供了科学支撑，具有一定的科学意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于宁夏回族自治区固原市原州区(106°13′E, 36°14′N[15])彭堡镇，地处宁夏南部，六盘山东北麓，黄土高原中西部，区域内山多川少，为内陆暖温带半干旱气候，年平均降水量 300～500 mm，年平均蒸发量 800～1 200 mm，多年平均气温 6.75 ℃，多年平均日照时 2 250～2 700 h，无霜期 144 d。该区域的土质组成质地较为单一、土层较为深厚、地下水埋深较浅。土壤机械组成详见表 1。试验所需观测红梅杏树树龄均为 4 a，林相整齐，单株差异较小。

表 1 试验地土壤机械组成

土壤类型	不同粒径的颗粒组成范围/%			田间持水量/%
粉黏土	2～0.02 mm	0.002～0.02 mm	<0.002 mm	35%
	9.46%	16.67%	73.87%	

1.2 田间布置

覆膜集雨渗灌技术是以主干[16]为中心，沿果树行向[17]在树干两侧 100 cm 各覆盖 0.01 mm 厚的黑色地膜[18]，在距树干两侧 50 cm 处各埋置渗灌器，渗灌器埋设位置顶部较四周田面低，利于集水。渗灌器为自主创新研发，渗灌器底部直径为 14 cm，顶部直径为 16 cm，高为 35 cm，顶部封口并打孔，渗灌器器身距顶部 5 cm，底部 5 cm，中间全打孔。埋置土壤水分传感器的方式为：水平方向以渗灌器顶部边缘处为观测原点，渗灌器顶部边缘延长线为基准线，向远离树干径向延伸；垂直方向以渗灌器顶部边缘为观测原点，渗灌器垂向边缘切线为基准线，向地表以下方向延伸，传感器按 10 cm×10 cm 呈网格状布置，共 30 个监测点，监测点第一层 $L_{10}D_{10}$(L 代表横向，D 代表纵向)为 1 号点，依次按远离渗灌器方向为 2，3，4，5 号点，第 2 层为 6—10 号，其他层以此类推。

1.3 数据采集与分析

(1) 降雨量的测定。在红梅杏树附近的空旷地设置翻斗式雨量计，每次降雨后雨量计所得数据即为天然降雨量。

(2) 土壤体积含水量的测定。采用 EC5 土壤水分传感器测定,设定为每 1 min 记录 1 次,数据采集使用 EM50 记录仪。

(3) 用 Excel 2016 对所得土壤体积含水量数据进行处理,用 SPSS 25 进行统计分析,用 Origin 2 017 进行绘图。

本次试验采用 2019 年 9 月 22—26 日共 5 d 数据,其中 22 日为降雨前 1 d,23 日为降雨日,累计降雨量为 20 mm,24—26 日为降雨后 3 d,期间无降雨。

2　结果与分析

2.1　土壤体积含水量分布特征

图 1 为竖直剖面降雨前 1 d,降雨日、降雨后 3 d 土壤水分的分布情况。从图 1 可以看出,分析时段内,不同深度处土壤含水量的分布特征基本一致[19],含水量由率先入渗点 30 cm 向上向下均呈先增大后减小[20]趋势,在 20—40 cm 深度范围内达到最大;相比降雨前,在降雨历时范围内,土壤含水量在各个深度处均有显著的增加;随着雨后时间的延长,整个果树周围土壤水分含量逐渐减小;分析时段内,不同径距土壤含水量的分布特征也基本一致,含水量随着径距的增加先增大后减小,在 20—40 cm 径距范围内达到最大;相比降雨前,在降雨历时范围内,土壤水含量在各个径距处均有显著的增加;随着雨后时间的延长,土壤水进行再分布,各个径距处土壤含水量逐渐减小。表 2 为整个分析时段内土壤含水量在不同深度处的分布特征。从表 2 可以看出,各层土壤水分的稳定性有所差异;由率先入渗点 30 cm 处往上土壤水分变异程度逐渐减小,土壤水分逐渐趋于稳定;往下变异程度先增大后减小,40—50 cm 深度范围内,土壤水分变异程度最大,表明该部分土壤中的水分最为活跃,这与此范围内土壤含水量较小和根系分布较密有关。表 3 为整个分析时段内土壤含水量在径向的分布特征。从表 3 可以看出,各个径距处土壤水分的稳定性也有所差异:整体上距离渗灌器越远,土壤水分的变异程度越小,即越稳定。综上,覆膜集雨渗灌条件下土壤水分的空间变异性是各尺度[21]上各种复杂因素和过程综合作用的结果[22]。

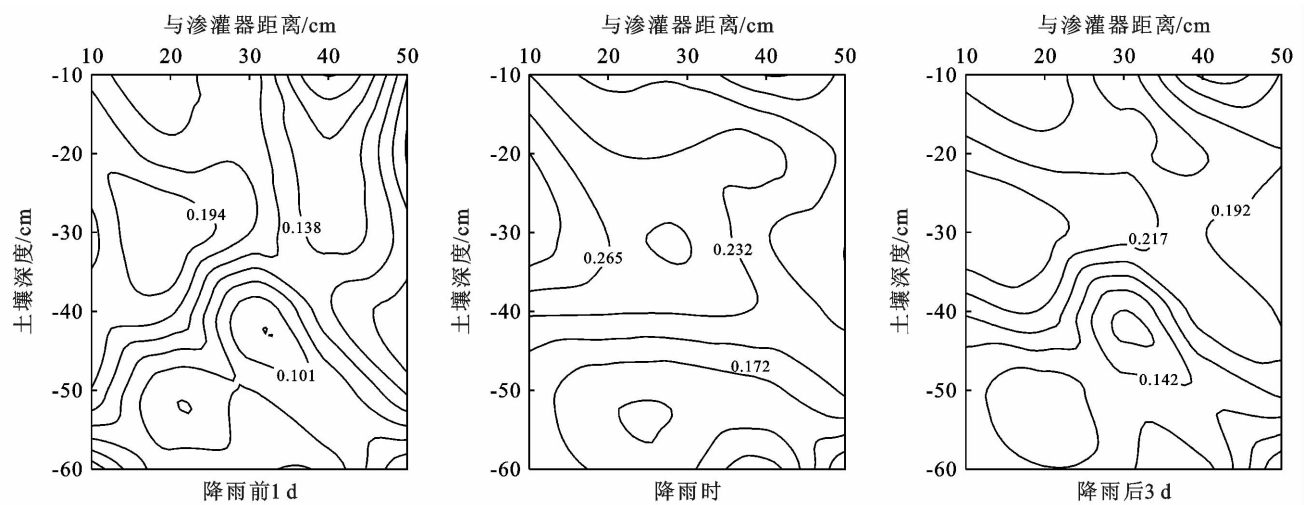


图 1　土壤含水量分布特征

表 2　不同深度土壤含水量分布特征

深度/cm	极小值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	极大值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	均值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	标准差/($m^3 \cdot m^{-3}$)	变异系数
0—10	0.071	0.278	0.182	0.040	0.221
10—20	0.114	0.300	0.196	0.044	0.225
20—30	0.126	0.331	0.224	0.051	0.260
30—40	0.089	0.305	0.187	0.046	0.247
40—50	0.091	0.289	0.147	0.043	0.293
50—60	0.066	0.293	0.152	0.040	0.274

2.2　土壤水分径向监测点的布设研究

将深度 0—60 cm 的土壤分为 6 层,每 10 cm 为 1 层,由时间稳定性特征选取径向代表样点,根据刘玉娇[14]和朱绪超[23]等的研究,土壤水分的时间稳定性计算公式为:

$$\delta_{ij}=\frac{\theta_{ij}-\bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \tag{1}$$

$$\delta_i=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\delta_{ij} \tag{2}$$

$$S_{\delta_i}=\sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{j=1}^{M}(\delta_{ij}-\delta_i)^2} \tag{3}$$

式中:θ_{ij} 为 i 测点在 j 时刻的土壤含水量;$\bar{\theta}_j$ 为 j 时刻每层的所有监测点土壤含水量均值;δ_{ij} 为 i 测点在 j 时刻的土壤含水量的相对偏差;δ_i 为 i 测点的平均土

壤含水量相对偏差；M 为监测次数；S_{δ_i} 为 i 测点土壤含水量相对偏差的标准差。δ_i 越接近 0 时，该测点越能代表研究层的平均土壤含水量；$\delta_i>0$ 时表示该测点的土壤含水量高于该层的平均土壤含水量；$\delta_i<0$ 表示该测点的土壤含水量低于该层的平均土壤含水量。S_{δ_i} 越小，该测点土壤含水量在时间上越稳定。

对各监测点在分析时段内的土壤含水量进行时间稳定性[24]分析，结果如图 2 所示。土壤平均含水量相对偏差主要分布在－0.3～0.3 之间，湿润区 22，13，12，26，1，11 号和干旱区 30，15，10，2，19 号的 S_{δ_i} ＜0.15，时间稳定性较好；9，8，5，18，4，27 号的 S_{δ_i} ＞0.25，时间稳定性较差；其余点的 S_{δ_i} 在 0.15～0.25 之间，时间稳定性一般。在所有监测点中，11 号监测点代表最湿润，22 号时间稳定性最好，30 号最干旱，9 号时间稳定性最差，21 号最接近该层的平均土壤含水量但是稳定性较差，22 号与 21 号在同一层且时间稳定性最好，故横向代表测点选 22 号。

表 3 不同径距土壤含水量分布特征

径距/cm	极小值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	极大值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	均值/($m^3 \cdot m^{-3}$)	标准差/($m^3 \cdot m^{-3}$)	变异系数
10	0.120	0.331	0.200	0.053	0.264
20	0.076	0.289	0.196	0.050	0.258
30	0.074	0.286	0.196	0.049	0.250
40	0.071	0.292	0.177	0.043	0.243
50	0.066	0.292	0.151	0.036	0.239

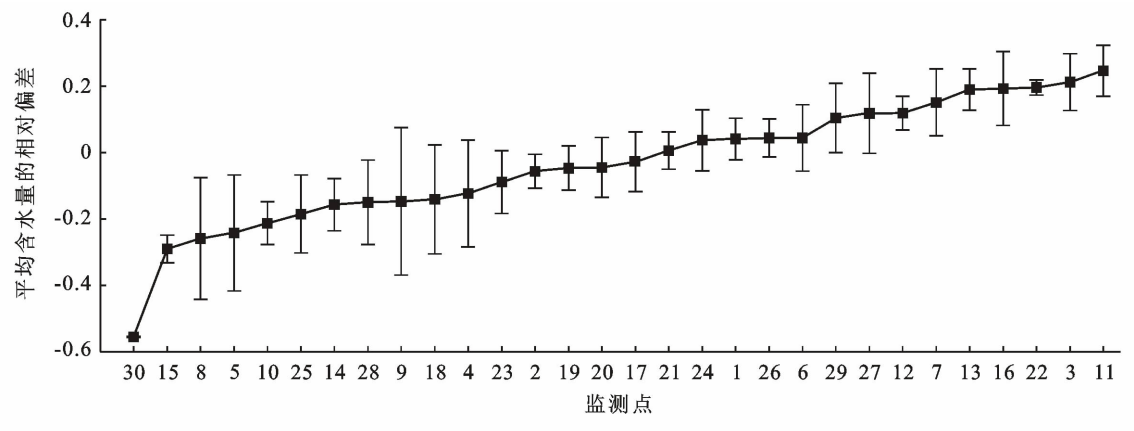


图 2 各测点平均土壤含水量的相对偏差排序

2.3 垂向监测点的布设研究

因为 22 号监测点最稳定且较湿润，同时考虑到土壤水分传感器探头的长度(5 cm)，故选定 22 号($L_{20}D_{50}$)的垂向(0—60 cm)各测点土壤含水量数据来反映根区土壤水分状况。

2.3.1 相关性分析 由分析时段内的数据分析 L_{20} 各监测点的土壤含水量之间的相关关系，结果详见表 4。由表 4 可知，L_{20} 各深度土壤含水量之间存在一定的相关关系，除第 3 层与第 4 层的相关性较小外，其他相邻两层间土壤含水量的相关系数都大于 0.7。相关系数为负一是由于随着降雨量的增加，渗灌器中的积水在深度 30 cm 处开始入渗，湿润锋不断向上下两侧推进，加之重力作用，在入渗过程中湿润锋向上推进速率比向下推进要小，二是由于果树的根系分布的影响，从而使某几层土壤含水量呈现负相关。其他土层间相关系数绝对值均在 0.4 以上。其中，第 5 层和第 6 层相关性最高，达到 0.996。因此在布设监测点时，可以适当拉大监测点的布设间距，从而减少布设个数，使 0—60 cm 土层中各层的土壤含水量状况可以用某几层来反映。

表 4 L_{20} 不同深度土壤体积含水量相关系数

土层深度/cm	土层深度/cm					
	10	20	30	40	50	60
10	1.000					
20	0.798**	1.000				
30	0.935*	0.900**	1.000			
40	0.023	−0.479**	−0.084**	1.000		
50	0.600**	0.930**	0.712**	−0.753**	1.000	
60	0.652**	0.948**	0.747**	−0.713**	0.996**	1.000

2.3.2 聚类分析 利用相关分析所得出的结果，以 L_{20} 垂向每个埋深处的土壤含水量作为一个变量，可得到 6 个变量，分别为 D_{10}，D_{20}，D_{30}，D_{40}，D_{50}，D_{60}，利用 R 聚类分析对这 6 个变量进行分类。R 型聚类分析将变量数据集自身作为 1 类，然后根据不同变量之间相似度或距离进行合并，合并后重新计算类间距

离,直到将所有变量归为一类。本文选用欧氏距离最短距离法[25]分析 L_{20} 处各深度的土壤含水量数据。图 3 为各深度处土壤含水量聚合过程谱系图,由图 3 可知,代表第 1 层、第 5 层、第 6 层处土壤水分的变量首先合并在一起,说明这 3 层的土壤含水量变量距离最小,所以可以考虑减少这 3 层的传感器的埋设数量。当 6 层土壤含水量状况被划分为 2 类时,第 4 层和其余的土层就是两大类;分为 3 类时,第 2 层和第 3 层的土壤含水量分为第 1 类,代表率先入渗时土壤含水量情况,考虑到渗灌器初始入渗点为 30 cm 处即第 3 层,故此处布设一个监测点;第 4 层为第 2 类,代表中层土壤含水量情况,且为根域层,此处布设一个监测点;第 3 类为第 5 层和第 6 层的土壤含水量,代表深层土壤含水量情况,在第 6 层处设置一个监测点;以此类推,分类数目越大,归类越详细,需要布设的监测点越多,传感器的需求量也就越大。综上所述,在 0—60 cm 范围内,只需在第 3 层,第 4 层,第 6 层处埋设 3 个土壤水分传感器即可。

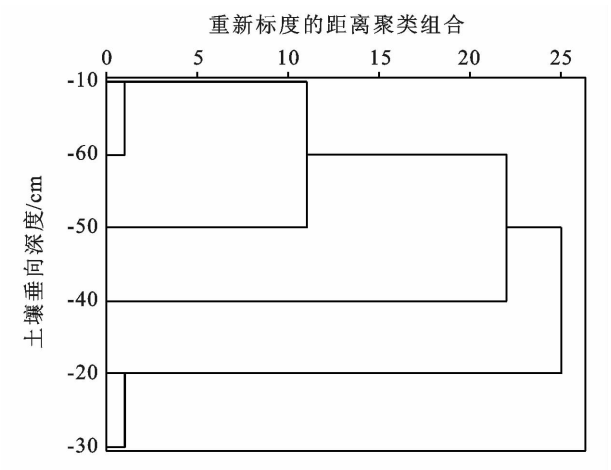


图 3　6 个深度土壤水分的聚类谱系图

2.4　平均土壤含水量预测模型建立

采用整个分析时段测得的土壤体积含水量数据,建立:①第 1—3 层(10—30 cm)平均土壤含水量与 $L_{20}D_{30}$ 测点含水量回归模型;②第 5—6 层(50—60 cm)平均土壤含水量与 $L_{20}D_{60}$ 测点含水量回归模型,模型表达式分别为:

$$Y=1.109X-0.067 \quad (4)$$

式中:Y 为 1—3 层(10—30 cm)土壤体积含水量均值;X 为 $L_{20}D_{30}$ 测点的土壤体积含水量的实测值。

$$Y=1.427X-0.070 \quad (5)$$

式中:Y 为第 5—6 层(50—60 cm)土壤体积含水量均值;X 为 $L_{20}D_{60}$ 测点的土壤体积含水量的实测值。对回归方程进行显著性检验,结果详见表 5。

表 5　10—30 cm 和 50—60 cm 相关回归系数的显著性检验

项目	非标准化系数		标准化系数	t	sig.
	B	标准误差			
常量(30 cm 处)	−0.067	0.001		−63.127	0.000
X(30 cm 处)	1.109	0.004	0.976	284.441	0.000
常量(60 cm 处)	−0.070	0.000		−325.067	0.000
X(60 cm 处)	1.427	0.001	0.999	1156.072	0.000

2.5　预测模型验证

根据上述预测模型和雨量计记录的数据,选取 2019 年 10 月 23—27 的土壤体积含水量数据(10 月 24 日为降雨日,前 1 d 后 3 d 无降雨)进行预测,并与实测值进行比较,以检验模型的精确度与可靠性。从降雨开始前到降雨后 3 d 每隔 10 h 选取 1 个数据,共 10 个数据,第 1 个数据作为 0 时。从表 6 中可知,将 $L_{20}D_{30}$,$L_{20}D_{60}$ 测点的回归值分别与 30,60 cm 深度土壤含水量实测值比较,绝对误差率在 ±5% 以内;回归值与实测平均值相对误差在 ±5% 以内,误差较小,符合实际要求,说明 $L_{20}D_{30}$,$L_{20}D_{60}$ 点的实测值可以估算 10—30,50—60 cm 深度土壤含水量。

表 6　模型预测和实测的土壤含水量对比

深度/cm	时间/d	回归值(a)	实测值(b)	实测均值(c)	绝对误差(ab)	相对误差(ac)
30	0	0.242	0.279	0.243	−0.037	−0.001
	10	0.247	0.283	0.247	−0.036	−0.002
	20	0.247	0.283	0.249	−0.036	−0.010
	30	0.234	0.271	0.243	−0.038	−0.040
	40	0.232	0.270	0.242	−0.038	−0.040
	50	0.168	0.212	0.173	−0.044	−0.030
	60	0.204	0.244	0.200	−0.041	0.019
	70	0.206	0.246	0.201	−0.040	0.024
	80	0.227	0.265	0.217	−0.038	0.049
	90	0.232	0.270	0.221	−0.038	0.048
60	0	0.236	0.214	0.246	0.022	−0.040
	10	0.242	0.219	0.252	0.023	−0.039
	20	0.250	0.225	0.255	0.026	−0.017
	30	0.241	0.218	0.240	0.023	0.002
	40	0.238	0.216	0.238	0.022	0.002
	50	0.116	0.130	0.117	−0.014	−0.014
	60	0.113	0.128	0.120	−0.015	−0.052
	70	0.113	0.128	0.120	−0.015	−0.055
	80	0.142	0.149	0.145	−0.006	−0.015
	90	0.150	0.154	0.149	−0.004	0.003

3　结 论

(1) 整个分析时段内,土壤含水量的垂向和径向

分布特征基本一致，水分含量在垂向和径向均先增大后减小。垂向由率先入渗点 30 cm 处往上土壤水分变异系数逐渐减小，往下变异系数先增大后减小；径向整体上距离渗灌器越远，土壤水分的变异系数越小。

(2) 通过相关性分析，除第 3 层与第 4 层的相关性较小外，其他相邻两层间土壤含水量的相关系数均在 0.7 以上；利用聚类分析得出，只需在 L_{20} 处的第 3 层(30 cm)，第 4 层(40 cm)，第 6 层(60 cm)处各埋设 1 个土壤水分传感器。

(3) 利用线性回归模型分析，并采用各监测点数据与模型预测值进行对比，绝对误差率在±5%内；模型预测值与相应代表层的平均值进行对比，相对误差率±5%内。这说明 $L_{20}D_{30}$，$L_{20}D_{60}$ 处的含水量分别可以反映 10—30 cm 和 50—60 cm 处的含水量情况。

[参 考 文 献]

[1] 张镇玺，徐国策，黄绵松，等. 固原市低影响开发措施下土壤水分时空变化[J]. 水土保持通报，2020，40(2)：162-169.

[2] Okuda I, Okazaki M, Hashitani T. Spatial and temporal variations in the chemical weathering of basaltic pyroclastic materials [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995,59(3):887-894.

[3] 王云强，邵明安，刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展，2012，23(3)：310-316.

[4] 周启友，岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报，2003，40(5)：683-690.

[5] 朱青，史伯强，廖凯华. 基于聚类和时间稳定性的土壤含水量优化监测[J]. 土壤通报，2015，46(1)：74-79.

[6] 闵俊杰，蒋立新. 基于时间稳定性和降维因子分析的土壤水分监测优化[J]. 黑龙江水利科技，2020，48(1)：43-45，50.

[7] 李彦. 北疆滴灌棉田墒情监测点优化布设及灌水下限指标研究[D]. 新疆 乌鲁木齐：新疆农业大学，2014.

[8] 李芳松，雷晓云，周世军，等. 膜下滴灌棉田墒情监测点的横向定位研究[J]. 节水灌溉，2011(4)：4-6，10.

[9] 吴宏平，王树仿，缴锡云. 膜下滴灌墒情监测点布设方案研究[J]. 水利与建筑工程学报，2015，13(2)：144-147.

[10] 毛晨鹏. 干旱坡地苹果园塑膜微集雨促渗技术研究[D]. 陕西 杨凌：西北农林科技大学，2015.

[11] 雷新周. 域内耕地雨水高效贮存发展高效农业是快速持久性根治耕地水土流失的捷径：非灌溉化治理耕地干旱水土流失模式[C]//西安理工大学. 水与社会经济发展的相互影响及作用：全国第三届水问题研究学术研讨会论文集. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[12] 金波. 干旱山地苹果园集雨—壤中防渗对土壤水分及其产量的影响[D]. 陕西 杨凌：西北农林科技大学，2018.

[13] 马春芽，王景雷，陈震，等. 基于温度植被干旱指数的土壤水分空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报，2019，38(3)：28-34.

[14] 刘玉娇，朱青，吕立刚，等. 基于时间稳定性和降维因子分析的土壤水分监测优化[J]. 土壤，2016，48(1)：186-192.

[15] 韩新生，王彦辉，邓莉兰，等. 六盘山叠叠沟华北落叶松林不同生长特征的土壤水分植被承载力的指示作用[J]. 中国水土保持科学，2015，13(5)：43-51.

[16] 李佳旸，王延平，韩明玉，等. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报，2017，25(5)：749-758.

[17] 郭伟，王延平，韩明玉，等. 起垄覆膜垄沟覆草对山地果树氮肥吸收利用的影响[J]. 节水灌溉，2018(2)：19-25.

[18] 金波，王延平，穆艳，等. 山地果园集雨—壤中防渗对水分入渗、分布和利用率的影响[J]. 应用生态学报，2018，29(5)：1559-1568.

[19] 赵琛. 蓄水坑灌果园土壤水分和养分监测点布设优化研究[D]. 山西 太原：太原理工大学，2016.

[20] 赵琛，孙西欢，马娟娟，等. 蓄水坑灌条件下果树水分测定探头布设优化研究[J]. 节水灌溉，2016(6)：41-45，50.

[21] 刘继龙，张舜凯，任高奇，等. 降雨对秸秆还田玉米地土壤水分空间变异性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报，2019，27(4)：768-779.

[22] 任高奇. 黑土区农田土壤水分的空间变异性与时间稳定性研究[D]. 黑龙江 哈尔滨：东北农业大学，2018.

[23] 朱绪超，邵明安，朱军涛，等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：212-218.

[24] 信秀丽，张佳宝，朱安宁. 区域土壤水分监测点布设方式探讨[J]. 灌溉排水学报，2008(3)：16-19.

[25] 郑利剑，马娟娟，郭飞，等. 蓄水坑灌下矮砧苹果园水分监测点位置研究[J]. 农业机械学报，2015，46(10)：160-166.