

# 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征

赵文举, 李晓萍, 范严伟, 郁文, 唐学芬

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 以西北旱区有着 300 多年历史的压砂地为研究对象, 利用平均相对偏差、统计回归等方法研究土壤水分的时空稳定性特征。结果表明, 表层土壤水分变异性最强, 随着土层深度的增大, 变异性减弱。0~10 cm 土壤水分高低值区差异较明显, 图形破碎化程度较大, 随着土层深度的增大, 土壤水分等值线由密变疏, 逐渐趋于平滑, 图形的破碎化程度相对减弱, 斑块的空间连续性增强。土壤水分在干旱条件下斑块的空间破碎化程度高于湿润条件下, 时间稳定性随土层厚度的增加而增强, 平均相对偏差及标准差变化范围较小, 可以选择代表性测点代表 0~10、>10~20、>20~30、>30~50 cm 土壤水分平均值的估计值。利用 2013 年数据建立的统计回归模型对 2014 年不同土层代表性测点土壤水分进行预测, 预测精度较高 (相对误差最大为 15.42%), 表明代表性测点可表征整个研究区土壤水分的均值。以期为该区域合理布设土壤水分监测点和墒情的准确预测提供理论依据。

**关键词:** 土壤水分; 干旱; 取样; 压砂地; 时空稳定性; 相对偏差; 预测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.019

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0144-08

赵文举, 李晓萍, 范严伟, 郁文, 唐学芬. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 144—151. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.019 <http://www.tcsae.org>

Zhao Wenju, Li Xiaoping, Fan Yanwei, Yu Wen, Tang Xuefen. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 144—151. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.019 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

水分作为环境体系中最活跃的因素是影响生态系统功能和过程的关键驱动因子<sup>[1]</sup>, 土壤水分是土壤-植物-大气连续体 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC 系统) 中大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节。由于受降雨、土壤质地、有机质、地形地貌、植被及人类活动等的影响, 土壤水分的时空分布存在不稳定性。国内外学者对土壤水分的空间变异性进行了大量研究<sup>[2-5]</sup>, 但要得到更可靠、稳定的土壤水分时空分布模式就要对土壤水分的时间稳定性进行研究<sup>[6]</sup>。而基于大田的土壤水分时空变异往往需要大量的观测数据, 因此在不丢失重要信息而将观测次数与观测点最小化的方法具有重要的研究价值<sup>[7]</sup>。为此, Vachaud 等<sup>[8]</sup>首先提出时间稳定性概念, 指空间采样点位置与土壤性质统计参数关系的时间不变性, 即找出几个代表性测点来代表整个研究区内土壤水分的平均值。Li 等<sup>[9]</sup>分析了黑河干流中游 3 个景观地区沙地、耕地及沼泽地土壤贮水量的时间稳定性, 找出代表性区域为以后很长一段时间内在更大研究区域的测量提供方法和依据。Penna 等<sup>[10]</sup>研究了 2 个高山坡不同土层土

壤水分在干旱和湿润条件下的时间稳定性, 得出山坡土壤水分具有强烈的时间稳定性和自相关性。白一茹等<sup>[6]</sup>研究了黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量的时间稳定性, 发现干旱条件下的变异系数比湿润条件下小。信秀丽等<sup>[11]</sup>研究了 32 和 0.05 km<sup>2</sup> 2 个尺度下土壤水吸力的时间稳定性, 发现灌溉对时间稳定性影响很大。刘继龙等<sup>[12]</sup>对果园土壤水分的时间稳定性进行了研究, 得出土壤水分的时间稳定性随土层厚度的增加而增强。张继光等<sup>[13]</sup>研究了喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异特征及分布格局, 表明土壤水分呈明显的斑块状或条带状分布, 季节性变化较明显。

压砂地是中国西北旱区劳动人民为了生存与自然抗争, 经过长期生产实践不断总结创新而形成的以砂石覆盖免耕为核心的保护性耕作模式, 起源于甘肃省兰州市附近的景泰县与永登县一带, 集中在白银市的中西北部, 以景泰县为中心的干旱、半干旱地区, 故又称兰州砂田、甘肃砂田, 距今已有 300 多年的历史<sup>[14-16]</sup>。土壤表层压砂可提高土壤的贮水能力, 但随着种植年限的增加土壤贮水能力逐渐下降, 保水性逐渐降低<sup>[17-18]</sup>。目前对土壤水分时空稳定性的研究大多集中在草地<sup>[19-20]</sup>、林地<sup>[21-22]</sup>、园地<sup>[12]</sup>、耕地<sup>[23]</sup>等土地利用方式, 而针对西北旱区有着 300 多年历史的压砂地土壤水分时间稳定性研究较少, 对不同深度压砂地土壤水分的时空稳定性更缺少系统性的理论研究。因此有必要对压砂地土壤水分的时空动态变化进行准确的预测。为此, 以景泰压砂地为例, 利用平均相对偏差、土壤水分等值线图等方法分析研究区域内土壤水分的时空变化规律, 得出土壤水分的时空稳定性

收稿日期: 2015-04-28 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51269008、51409137); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划资助项目(Q201310)。

作者简介: 赵文举, 男, 甘肃永昌人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究。兰州 兰州理工大学能源与动力工程学院, 730050。Email: wenjuzhao@126.com

特征及土壤水分时空稳定性之间的相关性和差异性,进而确定压砂地土壤水分测定的代表性测点,分析预测土壤水分的时空稳定性,以期为该区域合理布设土壤水分监测点和墒情的准确预测提供理论依据。

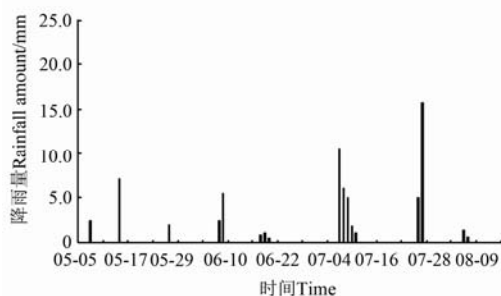
## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

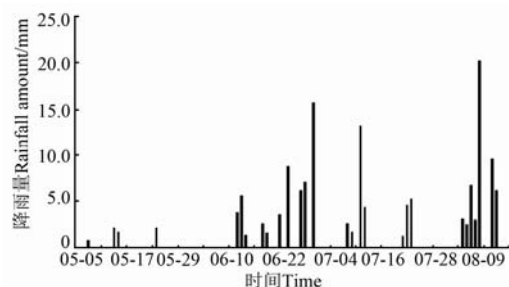
研究区位于甘肃省景泰县兰州理工大学试验基地附近 ( $104^{\circ}05'54''\text{E} \sim 104^{\circ}12'54''\text{E}$ 、 $36^{\circ}24'54''\text{N} \sim 36^{\circ}33'54''\text{N}$ ), 研究区压砂地种植面积约为  $3.33 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。地处河西走廊东端, 甘肃、内蒙、宁夏三省(区)交界处, 黄土高原与腾格里沙漠的过渡地带。土壤类型主要为洪积灰棕荒漠土和灰钙土。属温带干旱型大陆气候, 年日照时约为 2725 h、日照百分率 62%, 年均降水量 185 mm, 多集中在 7—9 月 3 个月, 2013 和 2014 年降雨量约为 150 和 240 mm; 年均蒸发量 3 038 mm。太阳辐射平均约为  $1.1766 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ , 年  $\geq 0$  的活动积温  $3614.8^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的有效积温  $3038^{\circ}\text{C}$ 、无霜期 141 d、年均温度  $8.2^{\circ}\text{C}$ 、极端最高气温  $36.6^{\circ}\text{C}$ 、极端最低气温  $-27.3^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 土壤含水率的测定

土壤采自野外大田的砂壤土, 采样时将表层砂石小心铲除, 取 0~50 cm 深的土壤测定颗粒级配,  $>1.0$ 、 $\geq 0.5 \sim 1.0$ 、 $\geq 0.25 \sim 0.5$ 、 $\geq 0.075 \sim 0.25$ 、 $<0.075$  粒径质量分数为 2.18%、9.79%、14.44%、60.54%、13.06%。为建立土壤含水率模型并选择代表性区域测定, 2013 年 5 月 18 日—8 月 3 日, 采样间隔为 1 周。试验期间有降雨, 如图 1 所示, 2013 年包括 2 次较大的降雨事件: 7 月 7 日 (10.5 mm) 和 7 月 27 日 (15.8 mm)。2014 年选择无降雨影响的代表性天气 5 月 10 日、6 月 7 日、7 月 17 日、8 月 15 日对选定的代表性进行测点及土壤含水率模型进行进一步验证。



a. 2013 年



b. 2014 年

图 1 试验期间降雨量

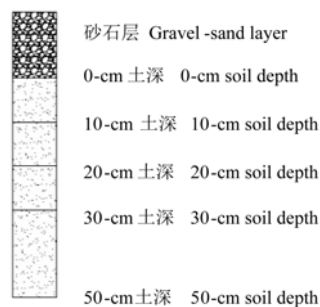
Fig.1 Rainfall during experiment

取样方法: 在东西与南北方向, 采用规格网格布点法, 考虑到研究区面积较大, 土壤质地相同, 地形地貌形似, 在不影响取样精度且工作量相对较小的情况下, 为了便于取样, 以网格最小尺寸为  $32\text{m} \times 32\text{m}$  的矩形网格取样作为每个试验块, 网格的尺度  $\varepsilon$  取 4 m, 网格最小尺寸的选择原则是必须保证每个网格中至少有 1 个测点。测点中心距为 4 m, 共 64 个取样点。在各样点分别对 0~10、 $>10 \sim 20$ 、 $>20 \sim 30$  和  $>30 \sim 50 \text{ cm}$  土层进行分层采样, 采样点均匀地分布在研究区域内, 取样点分布如图 2 所示。



a. 网格划分

a. Mesh generation



b. 土壤剖面示意图

b. Schematic diagram of soil profile

注:  $\varepsilon$  为网格尺度,  $n$  为总取样点数。

Note:  $\varepsilon$  is mesh size and  $n$  is total sampling points

图 2 土壤取样点分布示意图

Fig.2 Schematic of sampling point distribution of soil

测量方法: 采用烘干法测定土壤的质量含水率。

### 1.3 数据分析方法

研究方法: 本试验采用平均相对偏差和统计回归等方法进行分析。

Vachaud 等<sup>[8]</sup>提出, 各个点的平均相对偏差和标准偏差可以用来分析时间稳定性特征。任意一测点  $i$  在  $j$  日期的相对偏差:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m_1} \cdot \sum_{j=1}^{m_1} \frac{S_{ij} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} \quad (1)$$

$$\bar{S}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_{ij} \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为测点  $i$  的测定总次数 12 次,  $j$  表示采样时间,  $i$  表示采样点, 则  $S_{ij}$  表示第  $n$  个采样点  $j$  日期的土壤含水率,  $\bar{S}_j$  表示  $j$  日期所有采样点的平均土壤含水率,  $n$  为测定点的总个数 64 个。

平均相对偏差的标准差

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{m_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{m_i} \left( \frac{S_{ij} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} - \delta_i \right)^2} \quad (3)$$

变异系数  $C_v$  反映的是相对变异, 即随机变量的离散程度:

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{X}} \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为标准差,  $\bar{X}$  为土层的样本均值。根据变异系数对土壤含水率的变异性进行分类, 当  $C_v < 10\%$  为弱变异性,  $10\% \leq C_v \leq 100\%$  为中等变异性,  $C_v > 100\%$  为强变异性<sup>[24]</sup>。

对代表性测点与区域内土壤水分均值进行统计回归分析, 利用相关系数 ( $r$ )、均方根差 (RMSE) 和平均偏差 (MBE) 说明两者之间的差异性:

$$RMSE_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_i} (S_{ij} - \bar{S}_j)^2 / m_2} \quad (5)$$

$$MBE_i = \sum_{j=1}^{m_i} (S_{ij} - \bar{S}_j) / m_2 \quad (6)$$

式中:  $m_2$  为土层的样本均值。

RMSE 越小, MBE 越接近于 0, 说明代表性测点  $i$  的土壤含水率与研究区域土壤平均含水率关系密切, 差异性较小。

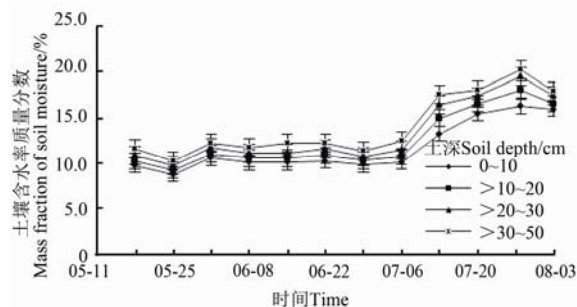
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分的时空变异特征分析

对不同土层土壤水分均值及变异系数进行时间序列特征分析, 见图 3。不同土层土壤水分均值及变异系数的相关性分析见表 1。

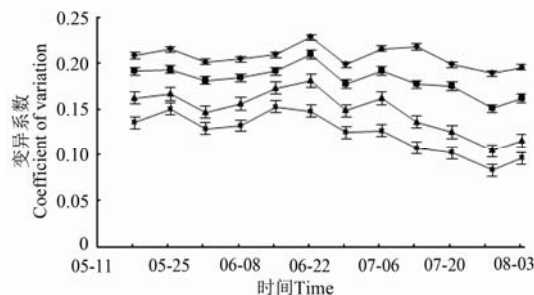
土壤含水量与降雨量关系密切, 较多的降雨量对应较高的土壤含水率。由图 3b 可知, 表层土壤含水量的变异性最强, 随着土层深度的增大, 变异性逐渐减弱。各土层土壤水分均值及变异系数随时间的变化趋势保持一致, 在采样时段内, 随着土层深度的增加, 0~

10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土壤含水率均值逐渐增大分别为 11.70%、14.00%、13.26%、12.49%, 对应变异系数均值逐渐减小为 0.2068、0.1821、0.1483、0.1241。



a. 土壤含水率

a. Soil moisture



b. 土壤含水率变异系数

b. Coefficient of variation of soil moisture

图 3 2013 年各土层土壤含水率及变异系数的时间序列特征  
Fig.3 Time series of soil moisture and coefficient of variation in each soil depth in 2013

土壤水分具有明显的季节性变化, 5、6 月土壤水分含量较低, 随着季节变化, 7、8 月土壤水分含量明显提高。0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土壤水分质量分数分别介于 8.78%~16.29%、9.27%~18.10%、9.74%~19.52%、10.29%~20.32%。除了 7 月 28 日和 8 月 3 日 >30~50 cm 的变异性属于弱变异 ( $C_v < 10\%$ ) 外, 其余都属于中等变异 ( $10\% \leq C_v \leq 100\%$ )。由表 1 得不同土层土壤水分均值之间及变异系数之间相关性较强, 且在 0.01 水平和 0.05 水平上显著。

表 1 不同土层土壤水分均值的相关性及变异系数的相关性

Table1 Correlation of mean and variation coefficient of soil moisture content at different soil layers

土深 Soil depth/cm	土壤含水率 Soil moisture				变异系数 Variation coefficient			
	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm	>30~50 cm	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm	>30~50 cm
0~10	1.000				1.000			
>10~20	0.986**	1.000			0.785**	1.000		
>20~30	0.993**	0.979**	1.000		0.739**	0.944**	1.000	
>30~50	0.951**	0.965**	0.958**	1.000	0.637*	0.867**	0.944**	1.000

注: \*\*表示在 0.01 水平上显著, \*表示在 0.05 水平上显著。

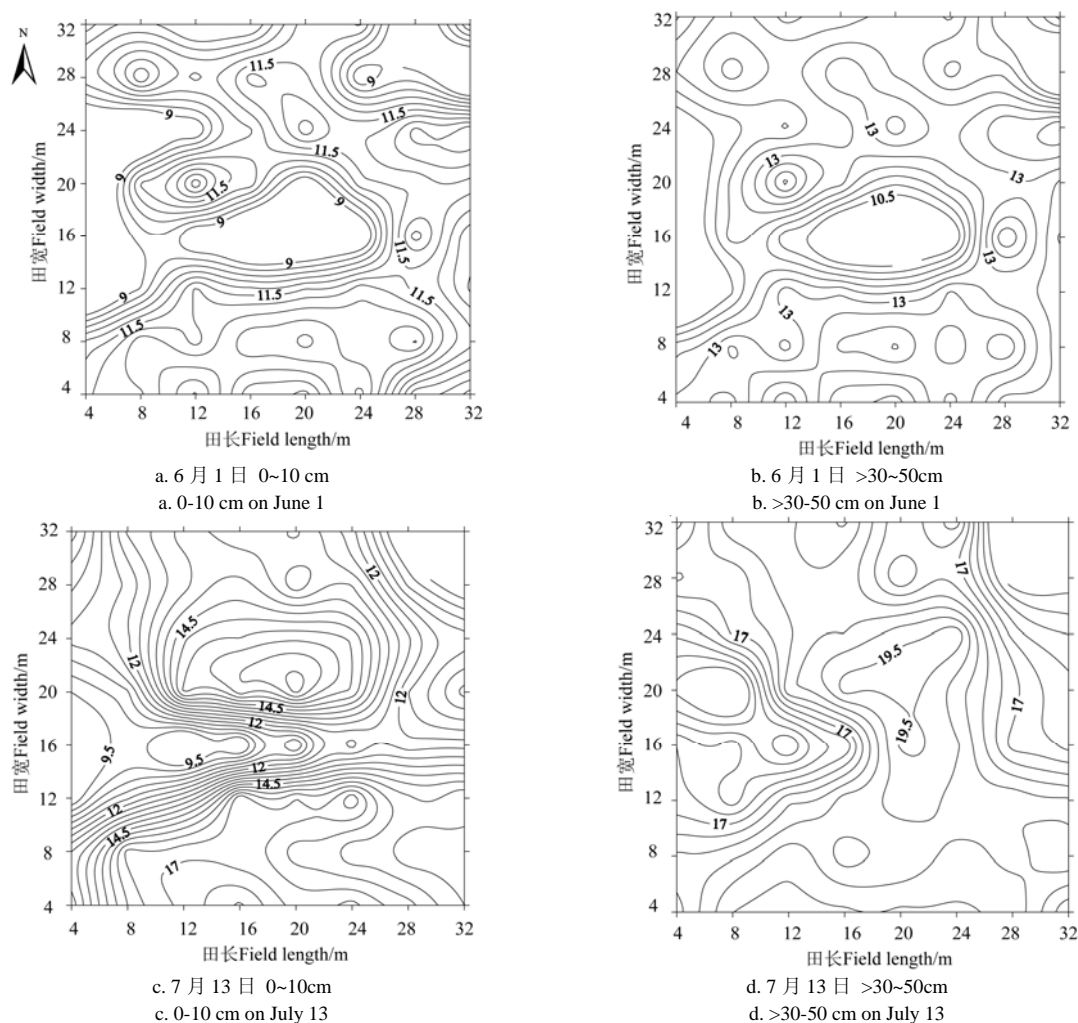
Note: "\*\*\*" represent significance at 0.01 level, "\*" represent significance at 0.05 level.

为了能更直观的反映土壤水分在时间及空间上的动态分布规律, 用美国 Golden Software 公司编制的汉化 pc 版 Surfer8.0 绘制无降雨影响 (2013 年 6 月 1 日) 和有降雨影响 (2013 年 7 月 13 日) 情况下, 不同深度 64 个测点的土壤水分等值线分布图。以 2013 年 6 月 1 日和 7 月 13 日 0~10 和 >30~50cm 土层为例, 由图 4 可知, 随着土层深度的增加, 等值线由密变疏, 逐渐趋于平滑,

这与变异系数反映的变异性一致。土壤水分分布呈明显的斑块状或条纹状, 0~10 cm 土壤含水量高低值区差异较明显, 且斑块范围较小, 变异系数为 0.2018、0.2177, 等值线分布破碎化程度较大, 6 月 1 日和 7 月 13 日 >10~20、>20~30 cm 变异系数与 6 月 1 日和 7 月 13 日 0~10 cm 相比分别减小了 0.0203、0.0406 和 0.0547、0.0812, 图形的破碎化程度相对减弱, 斑块的

空间连续性增强, 这与一些学者的研究结果类似<sup>[13,25]</sup>。土壤水分分布具有季节差异, 在无降雨影响的干旱条件下土壤水分斑块的空间破碎化程度高于有降雨影响的湿润条件下, 湿润条件下  $>30\sim50\text{ cm}$  含水量在较大变

化范围内并不明显, 变异系数为 0.1291、0.1078, 具有较好的时空一致性。这可能是由于土壤表层压砂后抑制了土壤水分蒸发, 水分的再分布较稳定, 但同时也可能受到地形、地貌、植被及人为因素等的影响。



注: 图中等值线数值为土壤水分质量分数, %。

Note: Values in figure are mass fraction of soil moisture, %.

图 4 2013 年不同土层土壤水分等值线分布图

Fig.4 Isoline distribution of soil moisture at different soil layers in 2013

## 2.2 土壤水分的时空稳定性及代表性测点确定

将不同土层 64 个采样点土壤水分的平均相对偏差由小到大排列, 按排列序数即秩次, 做出不同土层各测点土壤水分的平均相对偏差及标准差, 其中, 误差线为各测点平均相对偏差的标准差。不同土层各测点土壤水分的平均相对偏差及标准差如图 5 所示。由图 5 可知,  $0\sim10$ 、 $>10\sim20$ 、 $>20\sim30$  和  $>30\sim50\text{ cm}$  土壤水分平均相对偏差分别介于  $-26.94\%\sim21.89\%$ 、 $-23.40\%\sim17.26\%$ 、 $-18.24\%\sim13.33\%$  和  $-15.73\%\sim11.60\%$ , 平均相对偏差的标准差分别介于  $11.71\%\sim23.15\%$ 、 $10.85\%\sim22.18\%$ 、 $8.77\%\sim21.27\%$  和  $6.96\%\sim17.35\%$ , 随土层深度的增加, 土壤水分平均相对偏差及标准差的波动范围反而逐渐减小, 表明土壤水分的时间稳定性随土层深度的增加而增强, 这与白一茹<sup>[6]</sup>和潘颜霞<sup>[7]</sup>等的研究结果一致。

不同采样点土壤水分相对于整个试验区平均值的时

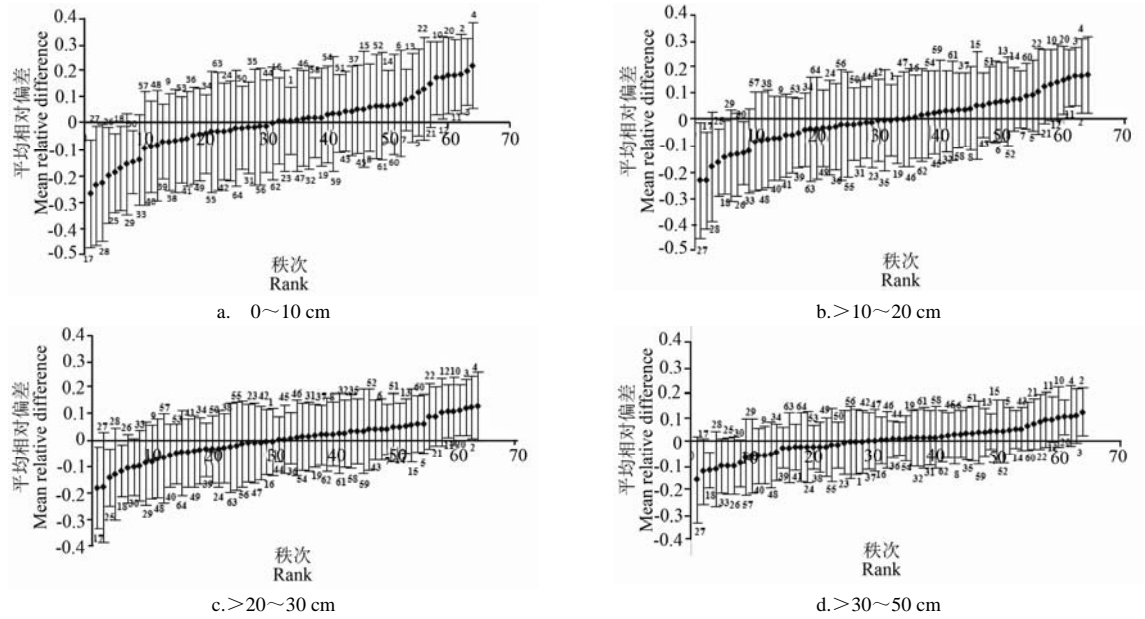
间稳定性可以用平均相对偏差的标准差来表征。该采样点标准差越接近于 0, 则该采样点土壤水分的时间稳定性越高<sup>[20]</sup>。代表性采样点的选择可根据平均相对偏差接近于 0, 且标准差较小原则<sup>[6]</sup>。由图 5a~d 可知, 测点 1、测点 1、测点 44 和测点 36 在研究时段内可分别代表  $0\sim10$ 、 $>10\sim20$ 、 $>20\sim30$  和  $>30\sim50\text{ cm}$  土壤水分均值。

## 2.3 代表性测点的合理性检验

土壤水分代表性测点表征整个研究区土壤水分均值的合理性, 对代表性测点进行合理性检验, 可为该区域合理布设土壤水分监测点和墒情的准确预测提供依据。2013 年采样时段内不同土层土壤水分均值与代表性测点的统计回归分析见表 2。由表 2 可知, 随着土层深度的增加, 代表性测点的决定系数逐渐增大, 由于表层土壤含水率变异性最强, 时空分布不稳定, 决定系数最小, 不同土层决定系数  $R^2$  介于  $0.769\sim0.937$ , 代表性测点土壤

水分含量与试验区土壤水分平均含量的相关性较高, 标准误差和平均偏差分别介于 2.271~3.513 和 0.611~

0.933, 统计量  $F>4.96$ , 说明回归模型的显著性水平较高, 差异性较小。



注: 误差线上数值为样点号。  
Note: Values above error bars are No. of samples.

图 5 2013 年不同土层各测点土壤水分的平均相对偏差及标准差  
Fig.5 Rank ordered mean relative difference and standard deviation for each point of different soil layers in 2013

表 2 不同土层代表性测点的统计回归模型

Table 2 Statistical regression model of representative point at different soil layers

土层 Soil layer/cm	测点号 No. of measuring point	回归模型 Statistical regression model	决定系数 $R^2$ Determination coefficient $R^2$	均方根差 Standard error	平均偏差 Average deviation	统计量 $F$ Statistic $F$
0~10	1	$\bar{S} = 0.871S_i + 1.471$	0.770	1.813	0.044	33.420
>10~20	1	$\bar{S} = 0.798S_i + 2.534$	0.811	1.571	-0.149	43.003
>20~30	44	$\bar{S} = 0.792S_i + 2.293$	0.865	1.424	0.595	63.841
>30~50	36	$\bar{S} = 0.868S_i + 1.700$	0.938	1.035	0.169	150.570

注:  $F$  大于  $F_{0.05}(1,10)=4.96$ , 说明显著。

Note: Significance if  $F$  is larger than 4.96.

为检验代表性测点的合理性及运用平均相对偏差接近于 0, 且标准差较小的原则选取代表性测点的准确性及

适用性, 用表 2 中的回归模型对 2014 年的代表性测点进行进一步验证, 见表 3。

表 3 不同土层土壤水分平均值的预测值

Table 3 Predicted value of mean soil moisture content at different soil layers

土层 Soil layer/cm	日期 Date	实测值 Measured value/%	预测值 Predicted value/%	相对误差 Relative error/%	相关系数 Correlation coefficient $r$	标准误差 Standard error	平均偏差 Average deviation
0~10	05-10	9.3391	9.4842	1.55	0.769	2.483	0.769
	06-07	9.7578	10.0939	3.44			
	07-17	9.4281	9.4842	0.59			
	08-15	9.3484	9.8326	5.18			
>10~20	05-10	10.0391	10.7534	0.55	0.611	3.513	0.611
	06-07	10.4297	10.9928	5.40			
	07-17	10.1172	10.4342	15.04			
	08-15	10.3469	10.7534	15.42			
>20~30	05-10	10.5766	10.609	10.33	0.835	2.271	0.835
	06-07	11.1406	11.6386	6.34			
	07-17	10.9641	10.8466	1.07			
	08-15	11.2875	11.3218	5.03			
>30~50	05-10	11.2844	11.5084	-12.87	0.933	3.296	0.933
	06-07	11.7422	11.9424	8.42			
	07-17	11.6969	11.8556	3.21			
	08-15	11.8469	11.8556	0.07			

由表 3 可知, 2014 年代表性测点实测值与预测值之间相关系数介于 0.611~0.933, 标准误差与平均偏差较小, 0~10、>10~20、>20~30 和>30~50 cm 土壤水分预测值的相对误差分别介于 5.18%~0.59%、15.42%~0.55%、1.07%~10.33%和-12.87%~0.07%, 预测精度较高。

### 3 讨 论

土壤质地、有机质、降雨、地形地貌、植被及人类活动等因素影响土壤水分的空间变异性。对于农田小尺度土壤空间变异性特征主要受土壤质地的影响, 代表性样点的选取对土壤水分空间变异性的研究具有一定的意义。若代表性测点的相关系数较高, 土壤水分的空间变异性较弱, 可选取 1 个最具有代表性的样点代表整个研究区域内土壤含水率的均值, 若代表性测点的相关系数较低, 可选取 2~3 个具有代表性的样点, 这样将使土壤采样和土壤含水率的测定工作更进一步简化。若土壤水分的空间变异性较强, 有可能选取不出代表性样点, 需要对整个研究区域内的土壤水分进行监测研究。文献[6]的研究表明 0~1 m 的土壤蓄水量平均相对偏差变化范围为-38%~57%, 平均相对偏差的标准差为 7.3%, 文献[12]研究表明土壤水分平均相对偏差介于-72.64%~53.68%, 平均相对偏差的标准差介于 8.77%~48.72%。而本研究中土壤水分平均相对偏差介于-26.94%~11.60%, 平均相对偏差的标准差介于 6.96%~23.15%, 其参数的变化范围较小。由于 0~20 cm 土壤水分的时空分布受到多种因素的影响, 人为因素影响较大, 土壤水分分布不稳定, 而>20~50 cm 土壤水分分布较稳定, 空间变异性较弱, 故>20~50 cm 土壤水分拟合精度高于 0~20 cm。研究区若土壤质地相同, 砂石覆盖均匀, 颗粒级配相同, 此采样方法可以运用到整个研究区域内的压砂地土壤水分采样。本研究采用小尺度 32m×32m, 可选取 1 个代表性样点研究土壤水分的时空稳定性, 但要运用到大尺度时, 需要选取多个代表性样点才能够代表研究区域土壤水分均值。

土壤水分时空分布的稳定性表明土壤水分时空变异结构研究具有可靠性, 也为西北旱作压砂地生态农业的管理提供了科学依据, 但如何将土壤水分时空分布的稳定性进一步用于网格一定的情况下, 大尺度土壤水分时空分布的演变规律上, 准确地选出适宜的代表性样点, 仍是进一步研究的内容。另一方面, 压砂地土壤水分补给的唯一来源是降雨, 其土壤水分的时空稳定性也会受到土壤质地、有机质、地形地貌、植被及人类活动等的影响, 在时间尺度上土壤水分的时空变异性及其主要影响因素还有待进一步研究。

### 4 结 论

1) 表层土壤含水率变异性最强, 且斑块范围较小, 等值线分布破碎化程度较大。随着土层深度的增大, 变异性逐渐减弱, 图形的破碎化程度相对减弱, 斑块的空间连续性增强。随着土层深度的增加, 土壤水分等值线由密变疏, 逐渐趋于平滑。土壤水分分布具有季节性差

异, 在无降雨影响的干旱条件下土壤水分斑块的空间破碎化程度高于有降雨影响的湿润条件。

2) 随土层深度的增加, 土壤水分平均相对偏差及标准差的波动范围反而逐渐减小, 表明土壤水分的时间稳定性随土层深度的增加而增强, 可以选择测点 1、测点 1、测点 44 和测点 36 在研究时段内可分别代表整个试验区 0~10、>10~20、>20~30 和>30~50 cm 土壤水分均值。用 2014 年实测土壤含水率数据验证以 2013 年代表性测定建立的预测模型, 表明 0~10、>10~20、>20~30 和>30~50 cm 土壤水分实测值与预测值间相对误差分别介于 5.18%~0.59%、15.42%~0.55%、1.07%~10.33%和-12.87%~0.07%, 预测精度较高, 可以为该区域合理布设土壤水分监测点和墒情的准确预测提供理论支撑。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 张川, 张伟, 陈洪松, 等. 喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性研究[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 1-12. Zhang Chuan, Zhang Wei, Chen Hongsong, et al. Temporal and spatial variation of surface soil water content on karst slopes in dry season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 81-86. Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2010, 26(1): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王丽霞, 段文标, 陈立新, 等. 红松阔叶混交林林隙大小对土壤水分空间异质性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 17-24. Wang Lixia, Duan Wenbiao, Chen Lixin, et al. Effects of gap size on the spatial heterogeneity of soil water in Pinus koraiensis-dominated broad-leaved mixed forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [5] Oguz Baskan, Yakup Kosker, Gunay Erpul. Spatial and temporal variation of moisture content in the soil profiles of two different agricultural fields of semi-arid region[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(12): 10441-10458.
- [6] 白一茹, 邵明安. 黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 45-50. Bai Yiru, Shao Mingan. Temporal stability of soil water storage on slope in rain-fed region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2011, 27(7): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [7] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 81-86.

- Pan Yanxia, Wang Xinping, Su Yangui, et al. Temporal stability of surface soil moisture in artificially revegetated desert area[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): 81—86. (in Chinese with English abstract)
- [8] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4): 822—828.
- [9] Li Danfeng, Shao Ming'an. Temporal stability of soil water storage in three landscapes in the middle reaches of Heihe River, northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(7): 3095—3107.
- [10] Penna D, Brocca L, Borga M, et al. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 55—71.
- [11] 信秀丽, 张佳宝, 朱安宁. 土壤水吸力空间分布规律的时间稳定性研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 15—19.  
Xin Xiuli, Zhang Jiabao, Zhu Anning. Temporal stability of spatial distribution pattern of soil water tension at different scales[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE)*, 2008, 24(5): 15—19. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 果园土壤水分时间稳定性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(4): 698—704.  
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua, et al. Temporal stability of soil moisture in an orchard[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(4): 698—704. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6334—6343.  
Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of Karst hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6334—6343. (in Chinese with English abstract)
- [14] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2): 105—127.
- [15] 雒焕炳. 白银地区砂田的防旱作用及其耕作[J]. *干旱地区农业研究*, 1991(1): 37—45.  
Luo Huanxin. Drought resistance role of pebble—mulched lands and its tillage in Baiyin prefecture[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1991(1): 37—45. (in Chinese with English abstract)
- [16] 许强, 强力, 吴宏亮, 等. 砂田水热及减尘效应研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2): 180—182.  
Xu Qiang, Qiang Li, Wu Hongliang, et al. Study on Sandy-field Ecosystem Effecton[J]. *Journal of Ningxia University: Natural Science Edition*, 2009, 30(2): 180—182. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王占军, 蒋齐, 何建龙, 等. 宁夏环香山地区压砂地土壤水分特征曲线及入渗速率的特征分析[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1364—1368.
- Wang Zhanjun, Jiang Qi, He Jianlong, et al. Analysis of soil water characteristic curve and infiltration rates of gravel-mulched land around Xiangshan Mountain area in Ningxia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (6): 1364—1368. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王平, 谢成俊, 陈娟. 不同种植年限砂田水盐变化与砂田退化初探[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 251—254.  
Wang Ping, Xie Chengjun, Chen Juan. Degredation of sand fields and water-salt variations with different planting years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(2): 251—254. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘鹤, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2389—2394.  
Liu Hu, Zhao Wenzhi, He Zhibin, et al. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2389—2394. (in Chinese with English abstract)
- [20] 冉有华, 李新, 王维真, 等. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 817—824.  
Ran Youhua, Li Xin, Wang Weizhen, et al. Grid scale temporal stability of multi-layer soil moisture in a grassland ecosystem in western China[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 817—824. (in Chinese with English abstract)
- [21] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011—4020.  
Mo Baoru, Cai Guojun, Yang Lei, et al. Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of Caragana korshinskii in Semiarid Loess Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4011—4020. (in Chinese with English abstract)
- [22] 魏新光, 陈滇豫, 汪星, 等. 山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 149—156.  
Wei Xinguang, Chen Dianyu, Wang Xing, et al. Time scale effect on main factors influence jujube transpiration in hillside jujube orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE)*, 2014, 30(17): 149—156. (in Chinese with English abstract)
- [23] 胡兵辉, 廖允成, 王克勤, 等. 毛乌素沙地农田土壤水分的时空变化格局[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 144—148.  
Hu Binghu, Liao Yuncheng, Wang Keqin, et al. Spatiotemporal patterns of soil water variations in farmland of MU Us sandland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 144—148. (in Chinese with English abstract)
- [24] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [25] 郭德亮, 胡伟, 樊军, 等. 黑河中游绿洲不同景观单元表层土壤水分空间变异性[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 25—32.  
Guo Deliang, Hu Wei, Fan Jun, et al. Spatial variability of surface soil moisture under different landscape units in the Heihe Oasis[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(2): 25—32. (in Chinese with English abstract)



## Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area

Zhao Wenju, Li Xiaoping, Fan Yanwei, Yu Wen, Tang Xuefen

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Gravel-sand mulched field in northwestern arid area has a history of more than 300 years, but little is known about spatial-temporal dynamics of soil moisture, which is important for prediction of soil moisture. Therefore, in this study, we designed a field experiment to investigate dynamics of soil moisture in Experiment Station of Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China. The experiment started from May 18 to August 3 in 2013. A field in width and length of 32 m was meshed by 4-m for soil sampling in each mesh grid. A total of 64 sampling points was designed. Soil samples were collected from the points at 0-10, 10-20, 20-30, and 30-50 cm for 12 times during the experiment. Based on the data, models were established for soil moisture prediction. Then, a similar experiment was conducted to collect samples to validate the model established in 2013. The results showed that the variability of surface soil moisture was largest and soil moisture distribution was in small patch-like pattern. The variability of soil moisture decreased with the increase of soil depth. Variation trend of mean soil moisture and coefficient of variation kept consistent over time in different soil layers. Mean soil moisture was 11.70% in 0-10 cm, 14.99% in 10-20 cm, 13.26% in 20-30 cm and 12.49% in 30-50 cm, respectively, indicating an upward trend with soil depth. However, the coefficient of variation was 0.2068 in 0-10 cm, 0.1821 in 10-20 cm, 0.1483 in 20-30 cm and 0.1241 in 30-50 cm, respectively, showing a downward trend with soil depth. The variation of soil moisture was largest in 0-10 cm. In addition, the study found that fragmentation degree of soil moisture distribution under dry condition was higher than wet condition, and temporal stability was high with the increase of soil depth. The relative deviation of soil moisture lied between -26.94% and 21.89% in 0-10 cm, between -23.40% and 17.26% in 10-20 cm, between -18.24% and 13.33% in 20-30 cm, between -15.73% and 11.60% in 30-50 cm. The standard deviation of the average relative deviation lied between 11.71% and 23.15% in 0-10 cm, between 10.85% and 22.18% in 10-20 cm, between 8.77% and 21.27% in 20-30 cm, between 6.96% and 17.35% in 30-50 cm. Spatial-temporal stability of soil moisture increased with the increase of soil depth. Based on information above, the representative measuring points of point 1, point 1, point 44, point 36 were selected for soil moisture estimation for 0-10, 10-20, 20-30 and 30-50 cm. The correlation coefficient between the estimated by representative measuring points and measured values was 0.877-0.968, and standard error and average deviation were small. Linear regression models were established based on the representative measuring points and validated by data obtained from 2014. The relative error between measured value and predicted value lied between 5.18% and 0.59% in 0-10 cm, between 15.42% and 0.55% in 10-20cm, between 1.07% and 10.33% in 20-30 cm, between -12.87% and 0.07% in 30-50 cm. It suggested that the prediction accuracy of models was high and the representative measuring points could be used for soil moisture estimation in the study area. The results provide valuable information for measuring point layout for soil moisture and accurate prediction of soil moisture in the study area.

**Key words:** soil moisture; drought; sampling; gravel-sand mulched field; spatial-temporal stability; relative deviation; prediction