

DOI: 10.5846/stxb201809272104

丁聪, 王冬梅, 贺康宁, 李平, 张鹏, 梁士楚. 黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性. 生态学报, 2020, 40(1): 151-160.

Ding C, Wang D M, He K N, Li P, Zhang P, Liang S C. Study of temporal stability of soil moisture on hillslope in loess regions of China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 151-160.

## 黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性

丁 聪<sup>1</sup>, 王冬梅<sup>1,\*</sup>, 贺康宁<sup>1</sup>, 李 平<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 梁士楚<sup>2</sup>

1 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

2 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006

**摘要:**为揭示黄土高寒区人工林土壤水分的时空变化特征, 基于 2018 年植被生长期一处典型人工植被恢复坡面 0—200cm 剖面土壤含水率连续动态数据, 运用经典统计和时间稳定性分析, 研究不同深度土壤含水率的时空变异性和时间稳定性。结果表明: 在测定时段内, 剖面各土层深度土壤含水率无显著差别, 在空间上均表现为中等变异性, 呈现随土层深度的增加而增大的趋势, 在时间上表层表现为中等变异性, 其余各层均表现为弱变异性, 深层土壤水分的时间变异性小于浅层; 随着测定时间变化, 试验地 0—200cm 土壤含水率 Spearman 秩相关系数均达到 0.8 以上, 且呈极显著相关, 表现出一定的时间稳定性特征; 土壤含水率的时间稳定性随土层深度的增加而增强, 具有深度依赖性; 基于相对差分分析可以选择代表性测点监测区域平均土壤含水率 (决定系数  $R^2$  为 0.7138—0.8605), 以为合理布设土壤水分监测点提供理论依据, 对于植被恢复与生态重建模式的选择具有指导意义。

**关键词:**土壤含水率; 时空变异; 时间稳定性

## Study of temporal stability of soil moisture on hillslope in loess regions of China

DING Cong<sup>1</sup>, WANG Dongmei<sup>1,\*</sup>, HE Kangning<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, LIANG Shichu<sup>2</sup>

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil & Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

**Abstract:** Studying the temporal and spatial variability of soil moisture in artificial ecosystems is of great significance for guiding the restoration of vegetation patterns and the efficient management and utilization of regional water resources. We selected an artificial vegetation restoration slope with a depth of 0—200cm in the loess alpine region for research, in order to reveal the spatio-temporal variation characteristics of its soil moisture. During the vegetation growth peak season in 2018 (June-August), continuous dynamic data of soil moisture content in different soil layers were measured by neutron meter. Based on this, the spatio-temporal variability and temporal stability of soil moisture at different depths were studied by using classical statistics and temporal stability analysis. The results showed that there was no significant difference in the soil moisture content of each soil layer profile during the period of measurement. At the spatial scale, the result indicated that all the soil layers showed a moderate variance which increased with the increase in soil depth. At the time scale, the topsoil layer showed a moderate variance while the other layers exhibited weak variance, which suggested that time variability of soil moisture in deep layer was smaller than that in shallow layer. The Spearman rank correlation coefficient of soil moisture content of 0—200cm in the experimental site reached 0.8 or more at different measuring periods, and the correlation with moisture was extremely significant. As the depth of the soil increased, the temporal stability of soil moisture also increased

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2017YFC0504604-04)

收稿日期: 2018-09-27; 网络出版日期: 2019-10-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@126.com

between different soil layers. Based on relative difference analysis, the representative measuring points can be applied to predict the average soil moisture content of the corresponding soil layers in a region (determination coefficient  $R^2$  is 0.7138—0.8605). In conclusion, with this paper we aim to provide a theoretical basis for the deployment of soil moisture monitoring sites, and suitable guidance for the selection of vegetation restoration and ecological reconstruction models.

**Key Words:** soil moisture content; spatiotemporal variability; temporal stability

黄土高寒丘陵区作为青藏高原和黄土高原过渡地带,是典型的生态交错区域,土壤和水文等环境条件复杂,生态环境脆弱,而土壤水分作为脆弱生态系统植被恢复和生态重建的重要限制因子,对整个生态系统的水热平衡及系统稳定性起着关键作用<sup>[1]</sup>。由于地形、气候和人类活动等多重因素的影响,土壤水分的时空分布具有变异性<sup>[2]</sup>,相关研究指出植被特征影响着土壤水分的空间分布,在一定程度上增强或减弱土壤水分的空间异质性<sup>[3-4]</sup>,而土壤水分的异质性的也对植被生长演替和空间格局有着不同程度的响应<sup>[5]</sup>,因此定量研究人工生态系统土壤水分的时空变异性是掌握区域生态水文动态变化的重要组成部分,对于指导植被恢复模式和区域水资源的高效管理及利用具有重要意义。

Vachaud 等<sup>[6]</sup>研究发现当土壤结构、地形等相对确定的外界因素保持稳定时,土壤水分的空间结构在时间上具有持续性,且某些测点可以代表区域平均土壤水分状况,随后这一现象被定义为土壤水分的时间稳定性<sup>[6]</sup>。近年来,许多学者对土壤水分时间稳定性开展了大量研究,但结论却不尽相同。Comegna 和 Basile 等<sup>[7]</sup>在较均质的砂质火山土耕地中发现土壤水分不存在时间稳定性特征,大量在异质性的土壤区域研究验证了时间稳定性的存在并发现可以利用代表性测点有效的监测预报区域土壤平均水分状况。周启友等<sup>[8]</sup>分析得出土壤含水量在三维空间的分布具有一定的结构和模式,并且这一结构和模式在时间上具有相对的稳定性,刘继龙等<sup>[9]</sup>在研究果园土壤水分时间稳定性的过程中发现不同深度土层的土壤含水量时间稳定性存在差异,Gao 等<sup>[10]</sup>在黄土高原坡地枣园研究发现可以利用时间稳定性选择代表性样点估计研究区的平均土壤水分状况,赵文举等<sup>[12]</sup>在压砂地的土壤水分时空分布特征研究中得出可以利用不同测点估计不同深度土壤的平均含水量。Gomez-Plaza 等<sup>[11]</sup>探讨地形、植被等因素对土壤含水量时间稳定性的影响时发现,当仅考虑地理位置和地形时,土壤水分呈现出时间上较为稳定的空间分布结构,而当加入植被因素时,土壤水在空间上的分布结构就变得不稳定<sup>[12]</sup>,以上结论表明了土壤水分的时间稳定性研究在非均质土壤背景下研究更有意义,同时植被因素深刻影响时间稳定性并对不同土层深度影响存在差异。黄土高原高寒丘陵区作为植被重建和生态退耕的重点区域,人工恢复植被极大的改变了区域本底的土地利用方式和植被特征,这种巨大的干扰对于土壤水分时空异质性和时间稳定性有怎样的影响尚待研究。为此本文选择植被生长旺盛的 6—8 月对一典型人工林坡面 0—200cm 深度土壤含水率进行了 10 次测定,应用经典统计分析土壤水分的时空变异规律,并利用 Spearman 秩相关系数、累积概率和相对差分分析该研究区土壤水分时间稳定性特征,探究不同深度土壤含水率的时间稳定性差异及相关性,进而确定研究区平均土壤含水率最佳代表性测点,以期为该区域水资源管理和植被建设提供理论依据。

## 1 试验和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省大通县安门滩流域(36.9°N、101.67°E),地处青海省东部河湟谷地,祁连山南麓,是青藏高原和黄土高原过渡地带。海拔高度 2460m。属于高原大陆性气候,冬季寒冷漫长,年内无霜期 61—133 天左右,年均气温 4.9℃ 年降水量 523.3mm,且年内降雨分配非常不均,6—9 月份降水占到全年的 71%,多以短历时强降雨为主,多年平均蒸发量 1762.8mm,最大蒸发出现在 4—6 月,表现出典型的北方春旱特征。土壤类型为黄土母质上发育的山地棕褐土和栗钙土。

### 1.2 点位布设及土壤含水率的测定

本研究在安门滩流域选择一个典型的植被恢复坡面,平均坡度 22°,在坡面上分布着树龄为 18 年的青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)等人工恢复植被。该坡面呈半弧状,从坡脚向上辐射状选取 3 条样线,各样线每隔 20m 布设一个土壤水分长期观测点,分别布置 12、15、8 个测点,共 35 个测点,测点位置如图 1。在测定前一个月采用土钻钻孔,将中子管放置于钻孔内并用干细土填实中子管与土体间隙。由于每个点位的钙质结核分布及厚度不同,实际布设的点位深度略有差异。其中测点 23、24、26、27 深度为 1.0m,其余测点深度为 2.0m。在 2018 年 6 月 16 日至 2018 年 8 月 18 日用 CNC503B 型中子仪测定土壤含水率,每周测定一次,共 10 次。测定时,每隔 10cm 测定一次土壤含水率,每层测定 3 次,取平均值作为该层土壤的中子数。用烘干法标定中子仪,标定公式为:

$$y = 0.7423x + 0.0213 (R^2 = 0.9747)$$

式中, $y$  为土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $x$  是中子计数比。

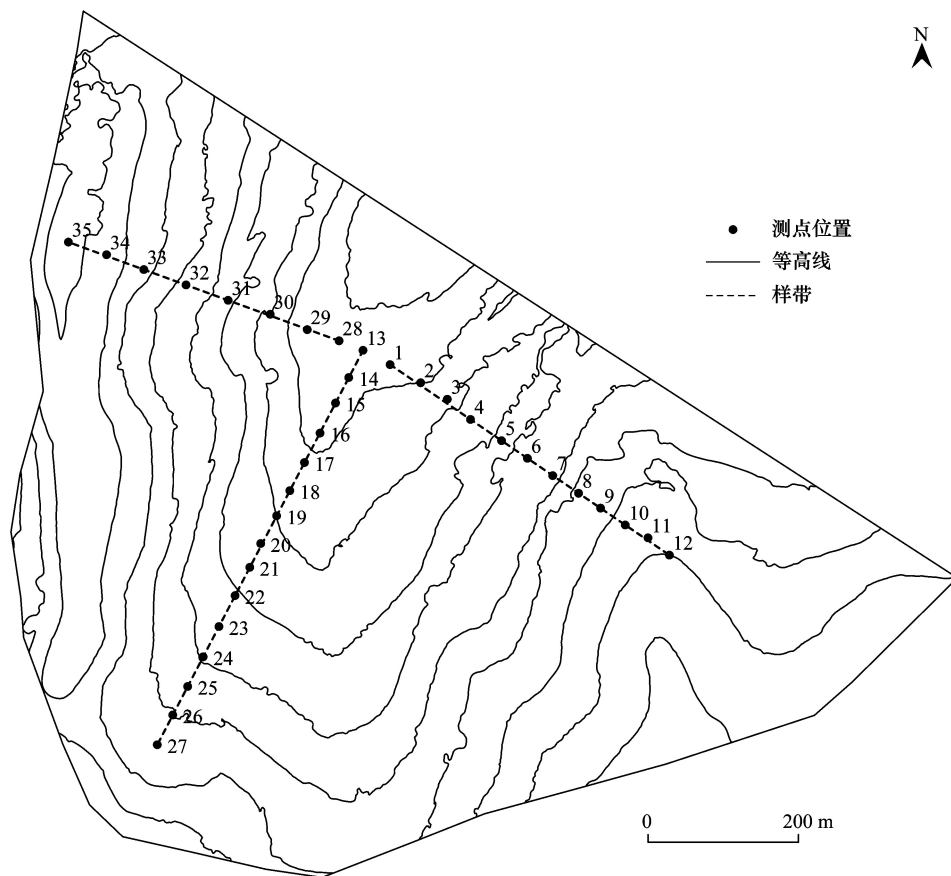


图 1 测点布设位置图

Fig.1 Locations of measuring points in study plot

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 经典统计方法

利用经典统计方法计算土壤含水率的平均值,以分析研究范围内土壤含水率的集中程度。通过计算标准差和变异系数,来描述土壤含水率在时间、空间上的分布情况和变异性。变异系数  $C_v$  反映的是相对变异,即随机变量的离散程度:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

式中,  $\sigma$  为样本标准差,  $\mu$  为土层的样本均值。根据变异系数可将土壤含水率的变异性进行分类<sup>[13]</sup>, 即为弱变异 ( $C_v \leq 0.1$ )、中等变异 ( $0.1 < C_v < 1$ )、强变异 ( $C_v \geq 1$ )。

### 1.3.2 时间稳定性分析方法

采用 Spearman 秩相关系数、累积概率和相对差分 3 种方法来研究土壤水分的时间稳定性。

Spearman 秩相关系数表明不同时间条件下不同空间位置土壤含水率的秩随时间变化特征<sup>[6]</sup>, 计算公式为:

$$r_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^N \frac{(R_{ij} - R_{il})^2}{N(N^2 - 1)}$$

式中,  $j, l$  代表不同的测次时间 ( $1 \leq j, l \leq 10$ );  $R_{ij}$  观测位置  $i$  在测定时间  $j$  下土壤含水率观测值的秩;  $R_{il}$  观测位置  $i$  在测定时间  $l$  下土壤含水率观测值的秩;  $N$  土壤含水率观测样点的个数, 取 35;  $r_s$  值越接近 1, 表示该位置的土壤含水率在  $j$  测定时间和  $l$  测定时间保持越高的相关水平, 时间稳定性越高。

累积概率函数。通过计算各测定时间下各测点土壤含水率的累积概率函数, 分析判断不同测定时间各测点土壤含水率是否保持相同的累积概率。

根据文献<sup>[6]</sup>的研究, 各个点的相对差分平均值和相对差分标准差可以描述时间稳定性特征, 观测点  $i$  在观测时间  $j$  的土壤含水率相对差分  $\delta_{ij}$  计算公式为:

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

其中

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij}$$

式中,  $\theta_{ij}$  为点  $i$  在时间  $j$  下的土壤含水率观测值;  $\bar{\theta}_j$  为时间  $j$  下所有测点土壤含水率的平均值。

因此测点  $i$  处的相对差分平均值  $\bar{\delta}_i$  和相对差分标准差  $\sigma(\delta_i)$  的计算公式分别为:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{ij}$$

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2}$$

式中,  $M$  为观测次数, 取 10。

一般认为  $\bar{\delta}_i$  越接近于 0, 该测点的土壤含水率越能代表样地平均土壤含水率;  $\sigma(\delta_i)$  越小的测点, 时间稳定性越高。通常可以选择  $\bar{\delta}_i$  接近于 0 且  $\sigma(\delta_i)$  越小的测点来估计研究区土壤含水率的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土层含水率时空分布特征

图 2 表示不同土层土壤含水率均值与降雨量随时间动态变化。可以看出, 在研究期间表层 (0—50cm) 土壤含水率变化趋势明显, 7 月前降水稀少, 强烈的土壤蒸发散使得表层平均土壤含水率一度低于 17%, 后续降雨使土壤水分迅速得到补充, 波动范围在 16.1%—25.2% 之间, 而 50—100、100—150、150—200cm 波动相对平稳, 持续维持在较高水平, 分别介于 21.1%—3.8%、21.4%—23.1%、22.3%—23.9%; 深层土壤含水率随时间的变化幅度小于浅层, 但通过 t 检验结果显示不同土层之间土壤平均含水率无显著差异。Gao 等<sup>[10]</sup>在黄土高原六道沟流域研究 0—300cm 不同土层深度储水量中也发现相似结论, 但 Hu 等<sup>[13]</sup>却发现浅层土壤含水率大于



深层。造成上述差异的直接原因在于本文和 Gao 等<sup>[10]</sup>研究区乔、灌、草植被类型多样,而 Hu 等<sup>[13]</sup>的研究在单一草本植被的山坡进行的,草本对浅层土壤水分的消耗相较于乔灌木少,植被因素干扰了土壤水分随深度变化的规律性,使得不同植被类型下土壤垂直剖面水分变化有较大差异。此外,在测定时段内,剖面土壤含水率标准差和变异系数均表现为随土壤加深先递减后稳定的趋势,其值分别是 2.9、0.8、0.6、0.6 和 13.5%、3.7%、2.6%、2.6%,表层与其他各层有显著差异,表层土壤水分的变化受到气象胁迫、土壤水分再分配和植被根系吸水的影响较大<sup>[3]</sup>,研究区绝对海拔高,太阳辐射强烈,退耕坡面地形破碎,更加剧了随机因素对土壤表层水分变化的影响,而深层土壤受到浅层土壤的保护受外界环境因素影响较小,并且人工引入植被种植年限较短(18年),乔灌木根系主要分布在 0—100cm 土层,100cm 以下土壤水分受植被根系耗水影响小,不同土层对于外界环境因子的响应有明显差异,也就导致了浅层土壤的时间变异性要高于深层,即土壤含水率往往在较深的土层中更稳定。

表 1 为土壤含水率在 10 个测次上各土层平均值、标准差和变异系数的空间统计特征。各土层空间上土壤含水率的标准差和变异系数的平均值随土层加深呈增大的趋势,分别为 4.0、4.2、4.6、5.8 和 18.7%、19.1%、20.7%、25.2%,且各土层之间差异显著( $P>0.05$ ),结果表明随土层加深,土壤含水率空间变异性增强,贾小旭等<sup>[14]</sup>也得出相同结论,土壤水分的空间分布在很大程度上取决于气候、地形、土壤质地等结构性因素,而耕作措施、植被恢复、人类活动干扰等随机因素则会降低土壤水分空间异质性,朝同质均一化发展<sup>[3]</sup>,本研究区为退耕还林坡面,受人类和动物活动影响频繁使表层的空间变异性得到一定程度的平滑,同时植被根系对土壤水分的选择性吸收则会进一步降低根层的空间异质性<sup>[15]</sup>,100cm 以下深度土壤结构基本没有扰动,土壤性质如颗粒组成、砾石含量、钙质结核分布的空间异质性随深度增加而累积,导致深层土壤含水率的空间异质性较浅层大。各土层变异系数分别介于 16.3%—23.4%,18.0%—20.0%,20.2%—21.2%,24.3%—25.8%,均表现为中等程度变异性,说明土壤水分具有较好的空间结构性,与刘继龙等<sup>[9]</sup>研究结果一致。另外,随土层加深,空间上土壤含水率的标准差和变异系数在时间上的标准差、变异系数均呈减小趋势,说明土壤含水率的空间变异性在时间上趋于稳定,即随着土层加深,土壤水分空间分布格局在时间上趋于稳定<sup>[16-17]</sup>。人工恢复植被在一定程度上影响了土壤水分的时空分布,但在土壤水分含量较高的阶段,土壤深度因素掩盖了植被因素。

## 2.2 土壤含水率的时间稳定性分析

### 2.2.1 Spearman 秩相关系数分析

各测点土壤含水率的 Spearman 秩相关系数可以描述研究区整体的时间稳定性特征<sup>[6]</sup>,表 2 是研究区 0—200cm 深度土壤含水率在各测定时间对之间的 Spearman 秩相关系数矩阵。由表 2 可知,7 月 7 日与其他测定日期的相关系数较小,介于 0.819—0.845 之间,其余日期对之间相关系数较大,介于 0.938—0.994 之间,这种差异可能由于 7 月 7 日测定前一周有较大的降雨量,土壤含水率变化较大,导致相关系数较小,信秀丽等<sup>[18]</sup>在土壤水吸力的时间稳定性研究中也发现,土壤干湿交替时,土壤水分的时间稳定性最差,但总体上各时间对之间相关系数均大于 0.8 且极显著相关( $P<0.01$ )。说明黄土高原高寒区人工林坡面 0—200cm 深度的土壤含水率空间分布在研究时段内具有时间稳定性特征,人工恢复植被对坡面土壤水分的时间稳定性影响有限。Grant 等<sup>[19]</sup>和刘泽彬等<sup>[20]</sup>也得到相似结论。但需注意的是,时间稳定性表现出与时间相关的变化趋势,采样时间越接近,相关系数越大,随着时间滞后的增加有减小趋势。这一结果说明土壤水分的时间稳定性持续时间是有期限的,这在其他以年际观测尺度的研究中也得出相似的结论<sup>[21-22]</sup>。本文是基于人工植被夏季旺盛

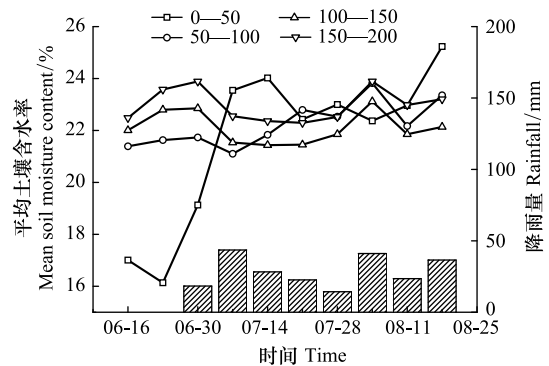


图 2 各土层的平均土壤含水率与对应日期的降雨量

Fig. 2 The mean soil moisture content of each soil layer and rainfall corresponding to the date

生长期展开研究,对于接下来的研究,可以考虑更长时间序列,探讨时间稳定性的有效期限。

表 1 不同土层土壤含水率时间上平均值、标准差和变异系数的空间统计特征

Table 1 Spatial statistical characteristics of temporal averaged, standard deviation and coefficient of variation of soil moisture content in different soil layers

		0—50cm	50—100cm	100—150cm	150—200cm
平均含水率 Mean soil moisture content	平均值/%	21.6	22.2	22.1	23.0
	最大值/%	25.2	23.8	23.1	23.9
标准差 Standard deviation	最小值/%	16.1	21.1	21.4	22.3
	标准差/%	2.9	0.8	0.6	0.6
	变异系数/%	13.5	3.7	2.6	2.6
	平均值/%	4.0	4.2	4.6	5.8
	最大值/%	4.4	4.7	4.8	6.1
变异系数 Variation coefficient	最小值/%	3.7	3.9	4.4	5.6
	标准差/%	0.3	0.3	0.1	0.2
	变异系数/%	6.4	6.0	2.8	2.9
	平均值/%	18.7	19.1	20.7	25.2
	最大值/%	23.4	20.0	21.2	25.8
变异系数 Variation coefficient	最小值/%	16.3	18.0	20.2	24.3
	标准差/%	2.2	0.6	0.4	0.4
	变异系数/%	12.0	3.3	1.7	1.7

表 2 研究区 0—200cm 土壤含水率的 Spearman 秩相关系数

Table 2 Spearman rank correlation coefficient matrix of the 0—200cm soil moisture content in the study area

测定日期 Measuring date	06-16	06-23	06-30	07-07	07-14	07-21	07-28	08-04	08-11	08-18
06-16	1	0.992 **	0.985 **	0.82 **	0.978 **	0.979 **	0.973 **	0.969 **	0.959 **	0.938 **
06-23		1	0.990 **	0.833 **	0.979 **	0.984 **	0.977 **	0.975 **	0.959 **	0.942 **
06-30			1	0.834 **	0.978 **	0.980 **	0.973 **	0.970 **	0.959 **	0.946 **
07-07				1	0.839 **	0.845 **	0.830 **	0.828 **	0.823 **	0.819 **
07-14					1	0.994 **	0.986 **	0.976 **	0.978 **	0.972 **
07-21						1	0.988 **	0.983 **	0.982 **	0.978 **
07-28							1	0.992 **	0.994 **	0.980 **
08-04								1	0.992 **	0.975 **
08-11									1	0.988 **
08-18										1

\*\* 表示差异显著,  $P < 0.01$

### 2.2.2 累积概率函数

累积概率函数是判断具体测点时间稳定性的有效方法,通过分析不同测定时间各测点土壤含水率累积概率的相似性来判断时间稳定性的强弱,图 3 是不同土层含水率在观测期间最干旱(6 月 16 日)和最湿润(8 月 18 日)两个时间点的累积概率分布特征,0—50、50—100cm 土层的 35 个测点中分别有 5 个和 9 个测点保持相同累积概率,100—150、150—200cm 土层的 31 个测点中分别有 10 个和 15 个测点保持相同累积概率值,在深层保持相同累积概率的测点数占比相比于浅层大,累积概率位置变化小,主要由于浅层土壤对降水、蒸发和植被因素敏感性更高,且地形因子引起的土壤水分的再分配最先影响表层土壤,而土壤结构和土壤的持水能力也由于土层间的缓冲而逐渐减小,从而使具体测点的累积概率在浅层位置变化大于深层<sup>[23]</sup>,在土壤水分条件由干旱状态转变为湿润状态这一过程中,深层土壤含水率空间分布格局的时间稳定性更强。但相关研究

中,白一茹等<sup>[24]</sup>在黄土高原丘陵区的 124 个水分监测点中仅有 1 个测点累积概率不变,Brocca 等<sup>[25]</sup>在意大利中部台伯河流域的研究中只有极少数测点保持相同的累积概率。与本研究的有较大差异,分析可能由于这两个研究中测点深度相比本研究浅,受地形和小气候的影响大,时间稳定性相对较弱。鉴于这些研究,我们认为采用累积概率确定土壤含水率最佳代表性测点受采样深度影响较大,不能简单的将累积概率位置不变的点作为该区域的代表性测点,Jia 等<sup>[17]</sup>也得到相似结论,而应进一步分析各测点的相对差分标准差。

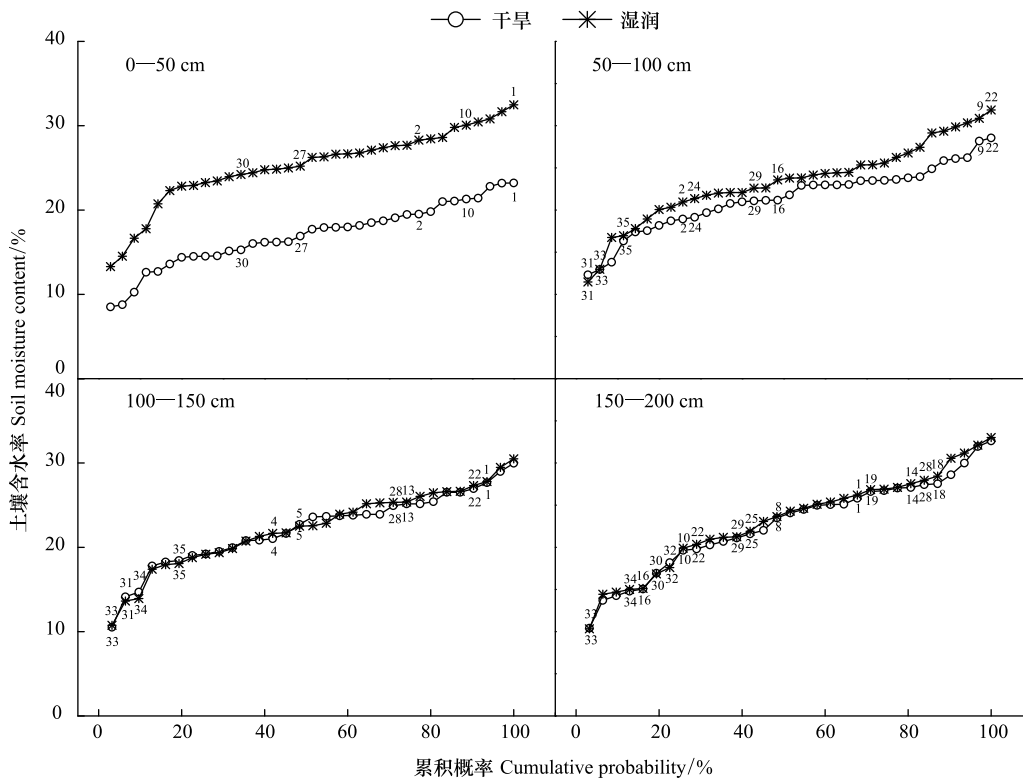


图 3 干旱和湿润条件下不同土层深度土壤含水率的累积概率(图中数字代表测点)

Fig.3 Cumulative frequency of the soil moisture content on different depths layer in the most dry and wet conditions

### 2.2.3 相对差分分析

图 4 为不同土层各测点土壤含水率的相对差分平均值按秩序数由小到大排列情况及对应的时间稳定性指数曲线,其中,垂直误差线为各测点相对差分标准差。土壤含水率的相对差分平均值变化范围从 $-43\%$ — $31\%$ ( $0-50\text{cm}$ ), $-46\%$ — $36\%$ ( $50-100\text{cm}$ ), $-48\%$ — $35\%$ ( $100-150\text{cm}$ ),到 $-52\%$ — $41\%$ ( $150-200\text{cm}$ )逐渐增大,这可能由于随土层加深,土壤含水率的空间异质性增强<sup>[17]</sup>,在上文变异系数分析时也得出相同结论,空间异质性越强,各测点土壤含水率相应越分散,偏离平均值也就会越大。这与 Zhang 等<sup>[21]</sup>结果一致。而赵文举等<sup>[2]</sup>在西北压砂地对土壤水分时空稳定性研究中发现,相对差分平均值的极差随土壤深度的增加而减小,这种差异的原因在于其研究范围较小( $32\text{m}\times 32\text{m}$ ),且压砂地土壤质地均一,砂石覆盖均匀,导致其土壤水分的空间变异较弱。朱续超等<sup>[26]</sup>研究发现相对差分平均值的波动范围可能与研究尺度、试验布设、采样方式等有关,随着研究区域的扩大,相应土壤性质、地形、植被覆盖越复杂,土壤水分的空间异质性越强,相对差分平均值的范围也随之增大<sup>[27]</sup>。空间变异性是在不同空间尺度上不同主导因素相互作用的结果,在尺度转换过程中,影响因素也随之变化,所以不同尺度的研究结果有所差异<sup>[28]</sup>。因此,对于具体研究对象,需要考虑采样尺度范围和采样粒度才能对土壤水分的空间异质性有更好的解释<sup>[29]</sup>。可以看到相对差分平均值是不对称的,负值绝对值大于正值,这是因为更多测点的土壤含水率小于平均值,可能因为这些测点土壤中砾石含量高,不利于水分的保持,具有较低的土壤含水率。相对差分标准差的大小可以表征测点土壤水分的时间稳定性程度,相对差分标准差越小,时间稳定性越高,各层土壤含水率的相对差分标准差平均值分别为  $5.8\%$ 、

4.4%、3.7%、3.2%，均小于 10% 且随土层加深呈减小的趋势，与以往研究结果类似<sup>[30-31]</sup>，Hu 等<sup>[13]</sup> 研究指出相对差分标准差或时间稳定性指数 < 5% 的测点具有较高的时间稳定性，可以代表研究区平均土壤含水率。据此比较，本研究中随土层加深，有较高时间稳定性的测点数量占总测点的比例分别为 51%、68%、74%、74%。大部分测点在不同深度土层都保持了时间稳定性特征，随着测定深度的增加，能代表区域土壤平均含水率的测点数占比增加，这一结论与李秀梅等<sup>[32]</sup> 的结论一致。土壤水分的时间稳定性是植被、地形、气候、土壤等众多因素相互作用的结果<sup>[33]</sup>，黄土高寒丘陵区无霜期短、降雨多以短历时暴雨为主的气候环境对土壤水分时间稳定性的影响有其特殊性，一年中长时间的土壤冻结使壤中流多以垂直运动为主，深层土壤水分得到有效补给，与此同时，多年沉积下的钙质结核分布，阻碍了土壤水分的垂直运动，对深层土壤水分的保持起重要作用，相关学者<sup>[11,16]</sup> 认为植被覆盖变化会降低土壤水分的时间稳定性，对土壤水分动态变化有不可忽视的作用，在本研究中发现人工恢复植被对根层土壤水分有一定的影响，对根层以下影响却不显著，主要由于植被生长旺盛期短，生长缓慢的植被特征使其生态耗水少，降水量基本满足植被生长需求。降水和蒸发是土壤含水率最直接的影响因素，但不同土壤深度对其响应有较大差异，坡面强降雨引起的地表径流对表层土壤水分补充明显，而不利于深层土壤水分入渗，同时表层土壤水分蒸发耗散量大，但土壤质地粗糙对深层土壤水分提升弱，综合因素导致深层土壤水分有利于保持较高的时间稳定性。上述研究结果表明，深层土壤的时间稳定性要高于浅层，土壤含水率的时间稳定性特征具有深度依赖性，这与相关研究<sup>[10,24]</sup> 结果一致。

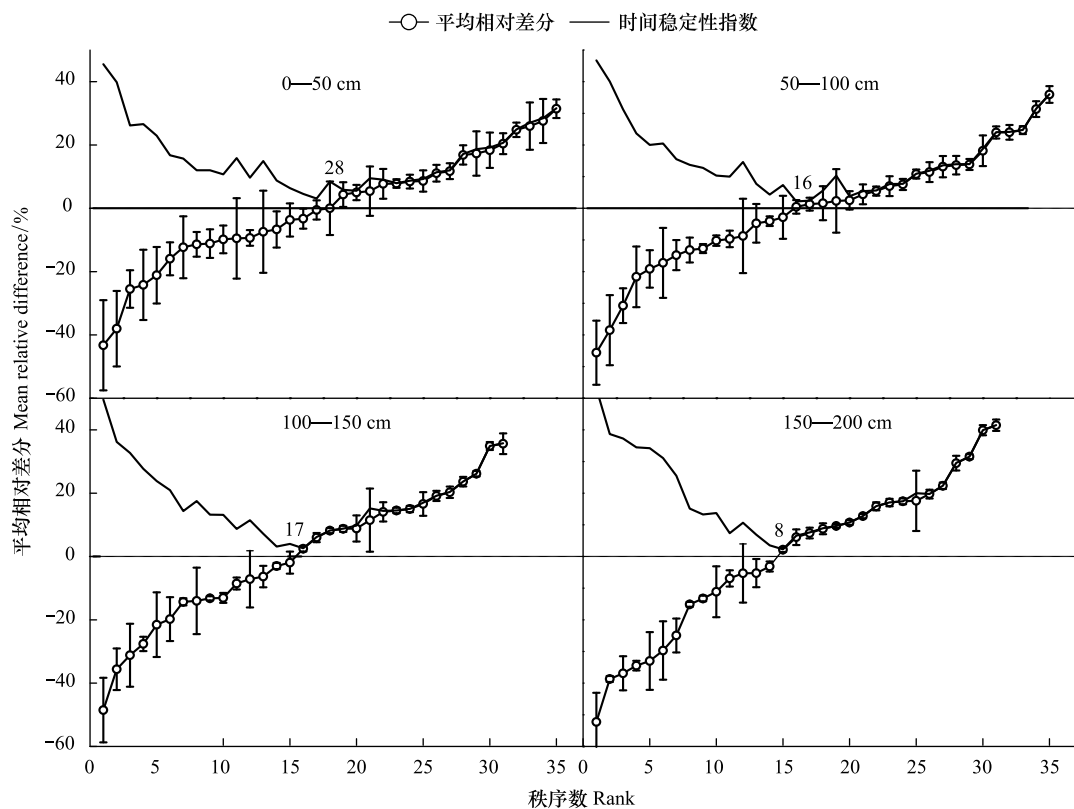


图 4 不同土层深度土壤含水率的相对差分平均值, 相对差分标准差和时间稳定性指数排序图(图中数字代表测点)

Fig.4 Soil moisture content rank maps of relative difference mean, relative difference standard deviation and time stability index at different soil depths

### 2.3 土壤含水率代表性测点的选择及合理性验证

有关学者研究<sup>[25]</sup> 表明可按照相对差分平均值接近于 0 且标准差相对较小的原则, 选择代表性测点来估计区域平均土壤含水率。测点 28、测点 16、测点 17、测点 8 在观测时段内可分别代表 0—50、50—100、100—150、150—200cm 土层范围的土壤含水率均值。为验证代表性测点的合理性, 通过将各代表测点的土壤含水



率与各土层土壤平均含水率进行对比后发现,各测点土壤含水率均在土壤含水率均值附近小幅浮动(图 5),同时对观测时段内不同土层土壤水分均值与代表性测点作回归分析发现,决定系数  $R^2$  的变化范围在 0.7138—0.8605,表明各代表性测点与相应土层土壤水分均值的相关性较高,可以较准确的估计研究区域各土层的平均土壤含水率。均方根误差和平均偏差分别介于 0.469—1.249 和 -0.26—0.46,均方根误差和平均偏差均较小说明代表性测点的土壤含水率与研究区各层的平均土壤含水率的关系密切,差异较小。

### 3 结论

(1)在观测期间,不同土层深度的土壤含水率无显著差异。随着土壤深度的增加,空间变异性逐渐增强,但均属于中等程度变异,具有较好的土壤水分空间结构。而时间变异性却相反,浅层相比于深层有更大的时间变异性,除表层(0—50cm)属中等程度变异性以外,其他土层呈现出弱变异性。

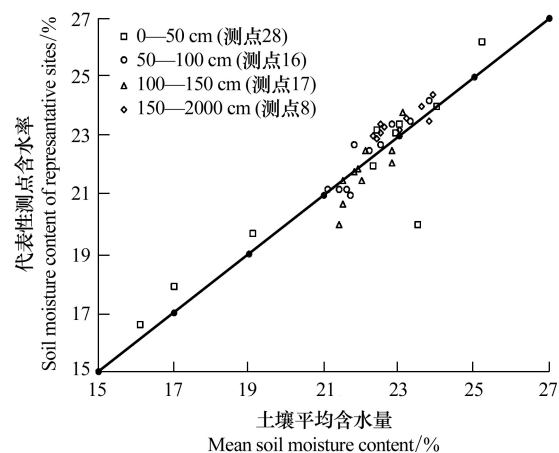


图 5 代表性测点的含水率和相应土层平均土壤含水率的关系

Fig. 5 The relationship between the soil moisture content of representative measuring sites and the mean soil moisture content of corresponding soil layers

表 3 最佳代表测点估算样地平均土壤含水率的精度参数

Table 3 Accuracy parameters of the best representative sites estimate field mean soil moisture content

土层深度/cm Soil depth	最佳代表性测点 Representative sites	回归模型 Regression model	决定系数 $R^2$ Determinant coefficients	均方根差 Root mean square error	平均偏差 Mean deviation
0—50	28	$y = 0.8801x + 2.6436$	0.821	1.249	0.06
50—100	16	$y = 1.2241x - 4.8397$	0.8605	0.469	0.14
100—150	17	$y = 1.4458x - 10.107$	0.7173	0.639	-0.26
150—200	8	$y = 0.643x + 8.6632$	0.7138	0.557	0.46

(2)黄土高寒区人工林坡面 0—200cm 深度 Spearman 秩相关系数在不同时间对之间均保持较高的相关性,随着测定时间间隔的推移,相关系数有减小的趋势,总体上土壤含水率的空间分布具有较高的时间稳定性特征。

(3)随着土壤深度的增加,土壤含水率的时间稳定性也相应增强,结合相对差分平均值和相对差分标准差可选择测点 28、测点 16、测点 17、测点 8 分别代表本研究区该时段内 0—50, 50—100, 100—150, 150—200cm 土层的土壤平均含水率,验证精度良好,为准确、可靠的掌握本研究区内平均土壤水分状态提供了便捷途径。

### 参考文献 (References):

- [1] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 梁洪波, 孔祥丽, 张伟. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系. 农业工程学报, 2010, 26(9): 87-93.
- [2] 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. 农业工程学报, 2015, 31(17): 144-151.
- [3] 赵亚楠, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3577-3586.
- [4] Cho E, Choi M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula. Journal of Hydrology, 2014, 516: 317-329.
- [5] Li P X, Wang N, He W M, Krüsi B O, Gao S Q, Zhang S M, Yu F H, Dong M. Fertile islands under *Artemisia ordosica* in inland dunes of northern China: Effects of habitats and plant developmental stages. Journal of Arid Environments, 2008, 72(6): 953-963.

- [ 6 ] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, Vauclin M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4) : 822-828.
- [ 7 ] Comegna V, Basile A. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesuvian Soil. *Geoderma*, 1994, 62(1/2) : 299-310.
- [ 8 ] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性. *土壤学报*, 2003, 40(5) : 683-690.
- [ 9 ] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 付强. 果园土壤水分时间稳定性研究. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(4) : 698-704.
- [ 10 ] Gao L, Shao M G. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena*, 2012, 95: 24-32.
- [ 11 ] Gómez - Plaza A, Alvarez - Rogel J, Albaladejo J, Castillo V M. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi - arid environment. *Hydrological Processes*, 2000, 14(7) : 1261-1277.
- [ 12 ] 王卫华, 王全九. 黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究. *农业机械学报*, 2014, 45(4) : 179-183.
- [ 13 ] Hu W, Shao M, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3) : 762-773.
- [ 14 ] 贾小旭, 邵明安, 张晨成, 赵春雷. 黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟. *水科学进展*, 2016, 27(4) : 520-528.
- [ 15 ] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*, 2002, 261(1/4) : 86-101.
- [ 16 ] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4) : 437-448.
- [ 17 ] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 33-42.
- [ 18 ] 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. *农业工程学报*, 2008, 24(5) : 15-19.
- [ 19 ] Grant L, Seyfried M, McNamara J. Spatial variation and temporal stability of soil water in a snow-dominated, mountain catchment. *Hydrological Processes*, 2004, 18(18) : 3493-3511.
- [ 20 ] 刘泽彬, 王彦辉, 徐丽宏, 刘宇, 邓秀秀, 王亚蕊, 左海军. 六盘山华北落叶松林坡面的土壤水分时间稳定性. *水土保持学报*, 2017, 31(1) : 153-159, 165-165.
- [ 21 ] Zhang P, Shao M A. Temporal stability of surface soil moisture in a desert area of northwestern China. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 91-101.
- [ 22 ] Penna D, Brocca L, Borga M, Dalla Fontana G. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 55-71.
- [ 23 ] Van Wesemael B, Mulligan M, Poesen J. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: the impact of rock fragments and soil thickness. *Hydrological Processes*, 2000, 14(10) : 1811-1828.
- [ 24 ] 白一茹, 王幼奇, 王建宇. 黄土丘陵区枣林土壤水分时间稳定性特征. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(1) : 23-34.
- [ 25 ] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. *Geoderma*, 2009, 148(3/4) : 364-374.
- [ 26 ] 朱绪超, 邵明安, 朱军涛, 张扬建. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究. *农业机械学报*, 2017, 48(8) : 212-218.
- [ 27 ] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6) : 1647-1656.
- [ 28 ] 刘继龙, 任高奇, 付强, 周延, 马孝义, 孙维敬, 张振华. 黑土区玉米地土壤水分的时空变异性研究. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6) : 1087-1099.
- [ 29 ] Fagan W F, Fortin M J, Soykan C. Integrating edge detection and dynamic modeling in quantitative analyses of ecological boundaries. *Bioscience*, 2003, 53(8) : 730-738.
- [ 30 ] Hu W, Shao M, Han F P, Reichardt K, Tan J. Watershed scale temporal stability of soil water content. *Geoderma*, 2010, 158(3/4) : 181-198.
- [ 31 ] Jia X X, Shao M A, Wei X R, Wang Y Q. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 254-264.
- [ 32 ] 李秀梅, 赵伟霞, 李久生, 栗岩峰. 水分亏缺程度对变量灌溉水分传感器埋设位置预判的影响. *农业工程报*, 2018, 34(23) : 94-100.
- [ 33 ] 高磊. 黄土高原小流域土壤水分时间稳定性及空间尺度性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.