

文章编号: 1008-2786-(2018)1-043-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000299

# 六盘山华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化

刘泽彬, 王彦辉\*, 徐丽宏, 邓秀秀, 田 奥

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

**摘 要:** 受气象、地形、土壤、植被因子的影响, 土壤水分具有坡面位置变化和空间尺度效应, 需对此深入理解和精细刻画, 以便为精细化森林管理、坡面生态水文研究中的代表性样地选择和尺度转化提供科学依据。在宁夏六盘山香水河小流域, 选择一个设置有空间连续样地的华北落叶松人工林典型坡面, 于 2015 年 5—10 月利用土钻取土, 并烘干测定了 0~100 cm 土层的质量含水量, 研究生长季内各月土壤含水量沿坡的时空变化规律。结果表明: (1) 土壤含水量存在沿坡变化, 在整个生长季表现为随水平坡长增加先逐渐升高, 在坡中上部(水平坡长 109.2 m)达到最大, 之后逐渐降低并在坡中下部(水平坡长 350.4 m)达到最小, 之后又有所回升。各月的土壤含水量沿坡变化趋势与整个生长季基本一致。(2) 土壤含水量存在坡面尺度效应, 表现为土壤含水量滑动加权平均值随水平坡长增加有明显变化, 整个生长季及各月的土壤质量含水量的坡面尺度效应的变化趋势基本一致, 但数值大小有所不同。(3) 在研究年份为平水年和降水较多的条件下, 土壤持水性能是影响土壤质量含水量沿坡差异格局的主要因素, 表现为各月土壤含水量均与土壤孔隙度、持水能力显著相关。(4) 对整个坡面平均土壤质量含水量而言, 最佳代表性样地位于坡中部相对水平坡长 0.57 处, 由此样地的土壤含水量测定值代表坡面均值, 并可利用本文建立的该样地土壤含水量测定值与坡面均值的关系式精确上推估计坡面均值。

**关键词:** 六盘山; 华北落叶松林; 坡面; 土壤质量含水量; 时空变化; 尺度效应

**中图分类号:** S714.2

**文献标志码:** A

土壤水分作为土壤-植物-大气连续体的一个关键因子, 对一系列水文和生物过程具有重要影响<sup>[1-2]</sup>。受气象、地形、土壤、植被等因素的共同影响, 土壤含水量有明显的时空变异性和分布格局<sup>[3-4]</sup>, 对此深入研究和定量描述, 将有助于促进林地产流产沙、土壤侵蚀及植被演替更新等方面的详细研究, 同时也可作为土壤水分动态模拟与预测提供依据。

土壤水分的时空变化格局具有尺度依赖性, 不同空间尺度土壤水分的时空变化格局及影响因素存在很大的差异<sup>[5-6]</sup>, 目前有关土壤水分时空变化格

局及影响因素的研究多集中在流域<sup>[7]</sup>及样地尺度<sup>[8]</sup>上, 而在坡面这个理解土壤水分时空尺度变化机理的关键研究尺度上, 开展的研究还相对薄弱。现有研究主要是对几个坡位的简单对比<sup>[9]</sup>, 还缺乏土壤水分在整个坡面的连续空间变化及尺度效应研究, 限制了利用典型样地测定值来精确估计坡面均值。同时, 在干旱缺水地区, 坡面上森林生长特征的空间格局与土壤水分条件息息相关, 研究坡面土壤含水量时空变化与尺度效应, 对合理确定不同坡位处土壤水分的植被承载力也有重要意义。

华北落叶松(*Larix principis-ruprechtii*)是我国北

收稿日期(Received date): 2016-12-08; 改回日期(Accepted date): 2017-02-26

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41471029, 41390461, 41230852); 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC0501603)联合资助。[National Natural Science Foundation of China (41471029; 41390461; 41230852); National Key Research and Development Program of China (2016YFC0501603)]

作者简介(Biography): 刘泽彬(1989—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事森林水文与树木生理方面的研究。[Liu Zebin (1989—), male, born in Qingdao, Shandong Province, Ph. D candidate, research on forest hydrology and tree physiology] E-mail: binarystar1989@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 王彦辉(1957—), 男, 河北安平人, 博士生导师, 研究员, 主要从事森林生态水文研究。[Wang Yanhui (1957—), male, born in Anping, Hebei Province, Ph. D. supervisor, professor, research on forest eco-hydrology.] E-mail: wangyh@caf.ac.cn

方的主要造林树种及宁夏六盘山地区最重要的造林树种,对该地区的水源涵养、水土保持以及固碳释氧等生态服务功能的提供有着不可替代的作用。由于六盘山地区降雨少且蒸发大,加之坡面水分再分配,强化了土壤水分的时空变异。了解该地区森林坡面的土壤水分时空变异规律及准确预测和估计森林坡面土壤水分的时间动态,对维护当地森林健康及进行林木精细管理有重要意义。为此,本研究在六盘山南部东侧半湿润区的香水河小流域,选择一个华北落叶松同龄人工林的典型坡面,在不同坡位设置了空间连续的样地,监测生长季内土壤含水量沿坡变化和时间动态,分析其空间尺度效应,评估不同坡位样地对整个坡面土壤含水量的代表性,并确定估计坡面平均土壤含水量的最佳代表性样地及位置,以期为该地区坡面土壤水分的代表性监测样地选择和预测以及森林与水资源的精细化综合管理等提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏六盘山南部东侧的香水河小流域( $106^{\circ}09' \sim 106^{\circ}30' \text{E}$ ,  $35^{\circ}15' \sim 35^{\circ}41' \text{N}$ ),面积  $43.73 \text{ km}^2$ ,海拔  $2010 \sim 2942 \text{ m}$ ,土壤类型以灰褐土为主。属温带半湿润气候,年均气温  $6.0^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $632 \text{ mm}$ 。小流域内植被类型丰富,天然次生林面积占比  $58\%$ ,主要树种有华山松(*Pinus armandii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和白杨(*Populus alba*)等;人工林面积占比  $24\%$ ,以华北落叶松为主,占人工林总面积的  $90\%$ ,另有少量油松(*Pinus tabulaeformis*)林。

在香水河小流域的分水岭沟子流域,选取了一个生长有华北落叶松的东南坡向的典型坡面。其水平坡长  $425.1 \text{ m}$ ,平均坡度  $27.8^{\circ}$ ,土层厚度在  $1 \sim 1.2 \text{ m}$  左右。坡面上所有的华北落叶松树木的年龄均为  $34 \text{ a}$ 。林下灌木发育不明显,覆盖度  $15\%$  左右,以蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii*)和野李子(*Prunus salicina*)等为主。林下草本覆盖度在  $40\%$  左右,以东方草莓(*Fragaria orientalis*)、苔草(*Carex hancockiana*)为优势种。

在该研究坡面,2015 年生长季(5—10 月)累积降水  $548 \text{ mm}$ ,接近于距研究地点约  $5 \text{ km}$  的泾源气

象站测定的多年(1960—2010)生长季平均降水量( $550.6 \text{ mm}$ ),可基本认为该年接近平水年,降水相对充足。此外,在研究中利用标准蒸发皿测定了该坡面所在地点的 2015 年生长季各月潜在蒸发量,其和为  $530 \text{ mm}$ ,略低于同期降雨量( $548 \text{ mm}$ ),表明气候相对湿润。2015 年各月降水量和蒸发量详见表 1。

表 1 研究坡面 2015 年生长季各月降水量和潜在蒸发量

Tab. 1 Monthly precipitation and potential evaporation during growing season of 2015

月份	5	6	7	8	9	10	合计
降水量/mm	40	147	75	91	156	39	548
潜在蒸发量/mm	69	117	121	114	58	51	530

注:降水量和潜在蒸发量分别由放置在距坡面  $100 \text{ m}$  空地上的标准雨量筒和蒸发皿测得。

### 1.2 坡面样地设置与调查

2015 年 5 月,从坡顶至坡脚,布设了一条宽  $30 \text{ m}$  的样带,将其划分为 16 个宽  $30 \text{ m}$ 、坡长  $30 \text{ m}$  的连续样地,对各样地进行每木检尺,调查树高、胸径、枝下高及冠幅直径等林分信息,并记录海拔、坡度等地形因子(表 2)。

### 1.3 土壤含水量的测定

在 2015 年 5—10 月,采用土钻法,于每月的上、中、下旬,各测定一次土壤质量含水量。在每个样地的上、中、下部位设置 3 个固定观测点,每次取样时在各固定观测点的  $3 \text{ m}$ (直径)范围内随机确定 1 个取样点<sup>[9]</sup>。各取样点均按  $0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 80 \text{ cm}$  和  $80 \sim 100 \text{ cm}$  分层取样。 $1 \text{ m}$  土层的平均土壤含水量为各层含水量的土层厚度加权平均值;各样地平均值为上、中、下 3 个坡位测定值的平均值;各月土壤含水量平均值为各月上、中、下旬 3 次测定值的平均值;整个生长季的土壤含水量为各月土壤含水量的平均值。

### 1.4 土壤物理性质的测定

在各样地的上、中、下部位,2015 年 7 月挖取一个剖面,利用环刀法(体积  $200 \text{ cm}^3$ )测定  $0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 80 \text{ cm}$  和  $80 \sim 100 \text{ cm}$  土层的容重、孔隙度及持水能力等物理性质。具体方法参见中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定》<sup>[10]</sup>。

### 1.5 地上生物量的调查

乔木层地上生物量:根据样地内调查的每株树的树高和胸径,利用刘延惠等<sup>[11]</sup>建立的该区域华北

表 2 典型坡面华北落叶松人工林样地基本信息  
Tab. 2 Basis information of *L. principis - ruprechtii* plantation plots on study slope

样地	海拔/m	坡度/(°)	水平坡长/m	坡位	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	枝下高/m	冠幅直径/m
1	2471.4	26.3	26.9	坡上	942	0.73	20.25	16.71	5.53	3.22
2	2458.1	27.2	26.7	坡上	749	0.74	21.04	17.04	5.77	3.58
3	2444.4	24.4	27.3	坡上	854	0.72	20.34	17.04	5.83	4.31
4	2432.0	25.3	27.1	中上	870	0.73	20.01	17.40	5.93	4.07
5	2421.3	22.5	27.7	中上	746	0.75	19.94	17.54	6.22	3.22
6	2409.8	24.5	27.3	中上	831	0.68	18.46	15.72	5.44	3.53
7	2397.4	22.0	27.8	坡中	719	0.81	21.03	17.94	6.43	3.41
8	2386.1	26.8	26.8	坡中	933	0.79	20.28	17.12	6.18	3.37
9	2372.6	27.7	26.6	坡中	815	0.73	19.78	17.87	6.46	3.29
10	2358.7	20.1	28.2	中下	674	0.67	20.83	18.24	7.05	3.76
11	2348.4	17.9	28.6	中下	572	0.65	20.62	17.75	5.88	3.46
12	2339.2	30.0	26.0	中下	770	0.70	19.69	17.04	5.52	3.23
13	2324.2	30.4	25.9	坡下	786	0.74	19.93	18.07	5.77	2.81
14	2309.0	37.4	23.8	坡下	1035	0.75	18.07	16.57	5.85	2.93
15	2290.8	37.3	23.9	坡下	955	0.70	18.36	15.97	5.32	4.80
16	2275.6	34.9	24.6	坡脚	907	0.72	18.72	16.19	6.06	3.33

落叶松地上生物量经验公式(1),逐株计算地上生物量,累积求和得出样地乔木层地上生物量。

$$\ln W = 0.9100 \ln(D^2 H) - 3.2417$$

$$R^2 = 0.9405$$

(1)

式中, $W$ 为单株华北落叶松地上生物量(kg/株), $D$ 为胸径(cm), $H$ 为树高(m)。

灌木层地上生物量:因样地内灌木少而分布不均,调查时记录每种灌木的数量,然后每种灌木选择2~3棵为标准株,从基部锯掉后带回实验室,放置80℃烘箱中烘干至恒重,测定单株生物量后乘以每种灌木的株数,得到样地内灌木层地上生物量。

草本层地上和枯落物层生物量:2015年7月,在每块样地内设置5个1×1 m的小样方,收集样方内所有草本的地上部分以及枯落物,分别放置80℃烘箱中烘干至恒重,称取干重,取平均值作为样地草本层地上生物量和枯落物层生物量。

1.6 叶面积指数的测定

2015年5—10月,于每月的上、中、下旬,利用LAI-2200c冠层分析仪测定每个华北落叶松林样地的冠层叶面积指数,测定时按固定的S形路线,每个样地38个测点,取平均作为该样地特征值。

1.7 数据处理与分析

在研究坡面上,各坡位样地的土壤含水量的绝对值指其实测值;土壤含水量的相对值指各坡位样地土壤含水量测定值与坡面均值(所有样地所代表坡段长度的加权平均值)的差值;离开坡顶相对水

平坡长指各坡位样地底端距坡顶的水平坡长与整个坡面水平坡长(425.1 m)的比值;土壤含水量沿坡位下降(水平坡长增加)的滑动加权平均值 $\theta$ 的计算见公式(2),当 $n = 16$ 时,即为所有样地所代表坡段长度的加权平均值(坡面加权平均值)。

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot L_1 + \theta_2 \cdot L_2 + \theta_3 \cdot L_3 + \cdots + \theta_n \cdot L_n}{\sum_{i=1}^n L_i}$$

(2)

式中, $\theta_1, \theta_2 \cdots \theta_n$ 指不同坡位样地的土壤含水量测定值(%); $L_1, L_2 \cdots L_n$ 指不同坡位样地代表坡段的水平坡长(m)。

土壤水分在坡面上存在着空间再分配,在假设仅是坡上部水分再分配影响坡下部的土壤水分,而坡下部土壤水分再分配难以影响坡上部土壤水分的条件下,本文视研究坡面在从坡顶向下截取不同坡长时就相当于一系列不同长度的坡面,从而能利用一个坡面研究土壤含水量的坡面平均值随坡面长度的变化。具体做法就是以坡面顶端为起点,向下通过各样地的逐个合并,不断扩大空间尺度(即坡面长度,表示为离坡顶的水平距离,下面简称水平坡长),形成一系列坡面;同时,利用公式(2)计算土壤含水量的坡面均值随水平坡长增大的变化过程,然后就可绘图表示并定量评价坡面平均土壤含水量随坡面长度增加的尺度变化特征。具体评价指标是土壤含水量的沿坡滑动加权平均值随水平坡长增加的

变化速率,如水平坡长每增加 100 m 对应的土壤含水量变化量。

利用 SPSS19.0 软件,进行 Pearson 相关分析,分析各月土壤含水量与对应月份叶面积指数的相关性,以及各月土壤含水量与立地因子(海拔、坡度)、研究年份的土壤物理性质(容重、孔隙度及持水能力等)及植被特征(密度、地上生物量、树高和胸径等)的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 样地土壤含水量绝对值的时空变化

由图 1 可知,在整个生长季,坡面上各样地土壤质量含水量存在坡位差异,变化范围 26.79% ~ 36.61%,变异系数 9.3%,利用各样地所代表坡段长度加权平均得到整个坡面土壤质量含水量平均值 31.43%。依据各样地测定值与水平坡长的拟合曲线可知,土壤质量含水量沿坡面的变化表现为随水平坡长增加先逐渐升高,在水平坡长 109.2 m 处达到最大,然后在 109.2 ~ 350.4 m 坡段内逐渐降低,在水平坡长 350.4 m 处达到最小,之后又逐渐增加。

各月份的土壤质量含水量坡面变化总体趋势与整个生长季基本一致,其随水平坡长增加均表现为“增加-降低-增加”的变化趋势(图 2)。但各月份土壤质量含水量沿坡面的变异程度有所不同,5—10 月份,土壤质量含水量的变异系数分别为 9.9%、

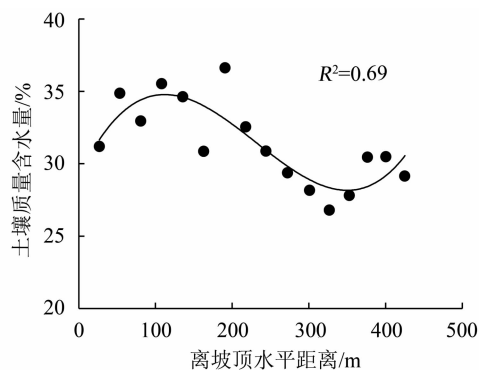


图 1 整个生长季 0 ~ 100 cm 土层土壤质量含水量随离坡顶水平距离的变化

Fig. 1 Variation of massive soil moisture in 0 ~ 100 cm soil layer during the whole growing season along horizontal distance from slope top

9.5%、9.8%、9.8%、9.9% 和 10.6%。此外,土壤质量含水量存在明显的月份差异,土壤质量含水量坡面均值的最大值出现在 6 月份(35.23%),最小值出现在 8 月份(28.10%)。

### 2.2 样地土壤含水量相对值的时空变化

为更清楚地评价各样地土壤含水量对整个坡面平均土壤含水量的代表性,进一步分析了不同坡位样地土壤含水量与坡面均值的差值随相对水平坡长的变化。依据各样地拟合曲线(图 3)可知,各月份不同坡位样地土壤质量含水量与坡面均值的差值,随相对水平坡长增加均表现为“增加-减小-再增

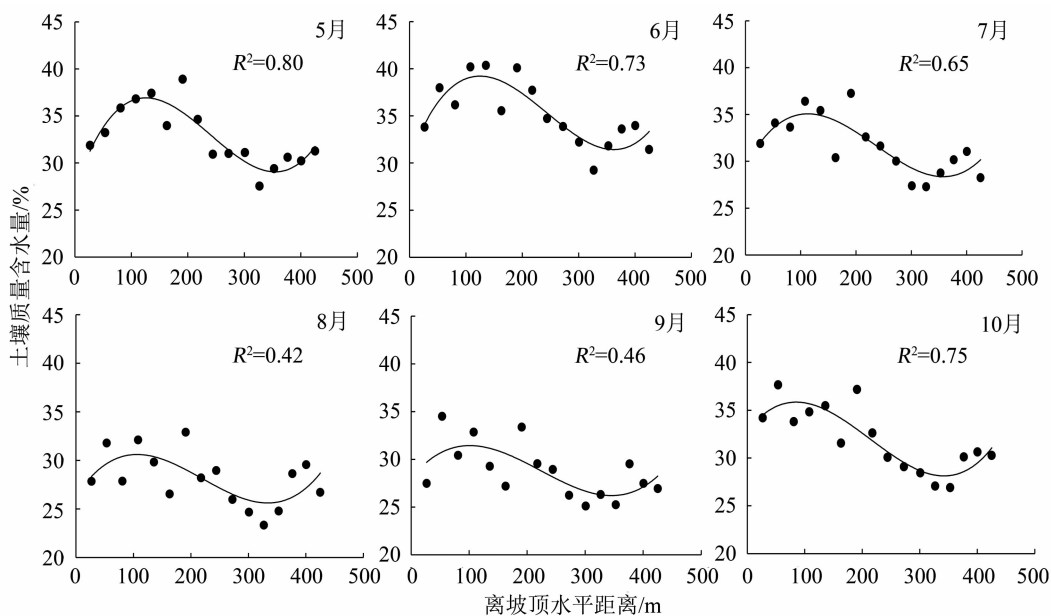


图 2 不同月份 0 ~ 100 cm 土层土壤质量含水量随离坡顶水平距离的变化

Fig. 2 Variations of massive soil moisture in 0 ~ 100 cm soil layer in different months along horizontal distance from slope top

加”的变化趋势。

但是,不同坡位样地的土壤含水量对坡面平均值的代表性在不同月份有所差异。5~6月份,不同坡位土壤质量含水量与坡面均值的差值变化范围分别为-3.74%~4.11%和-3.75%~4.05%;7月份,差值变化范围为-3.30%~3.44%;8月份,差值变化范围为-2.50%~2.50%;9月份,差值变化范围为-2.58%~2.67%;10月份,差值变化范围为-3.74%~3.98%。可见,不同坡位样地的土壤含水量对整个坡面平均值的代表性差异很大,且月份变化明显。总体来看,坡中部相对坡长0.57处(8号样地)的土壤质量含水量对坡面均值的代表性最好,与坡面均值的差值绝对值在不同月份的变化范围为0.02%~1.23%,平均仅为0.51%。利用5月26日、6月15日、7月02日、8月13日、9月16日和10月1日的土壤水分测定值进行的验证表明(表3),预测的相对误差在0.99%~12.22%之间,

精度较高,因此,可利用该样地(8号样地)作为代表性样地评估坡面土壤含水量。进一步建立了用代表性样地(8号样地)土壤质量含水量测定值( $\theta_{\text{样}}$ )估计坡面平均值( $\theta_{\text{坡}}$ )的回归关系:

$$\theta_{\text{坡}} = -4.2714\theta_{\text{样}}^2 + 3.6651\theta_{\text{样}} - 0.4076$$

$(R^2 = 0.841, P < 0.01)$

(3)

从预测值相对误差来看(表3),利用代表性坡位土壤含水量与坡面均值的回归关系式(3)来估计坡面平均土壤含水量,要比直接利用代表性坡位的测定值的精度高。

2.3 土壤含水量的坡面空间尺度效应

为评价坡面土壤质量含水量的空间尺度效应,分析了其滑动平均值从坡顶向下沿水平坡长增加的变化。由图4可知,在整个生长季,土壤质量含水量存在明显的坡面尺度效应,且其大小在不同坡段有所差异,在坡段0~156.3 m内为+2.06%/100 m,在坡段156.3~425.1 m内为-0.90%/100 m。

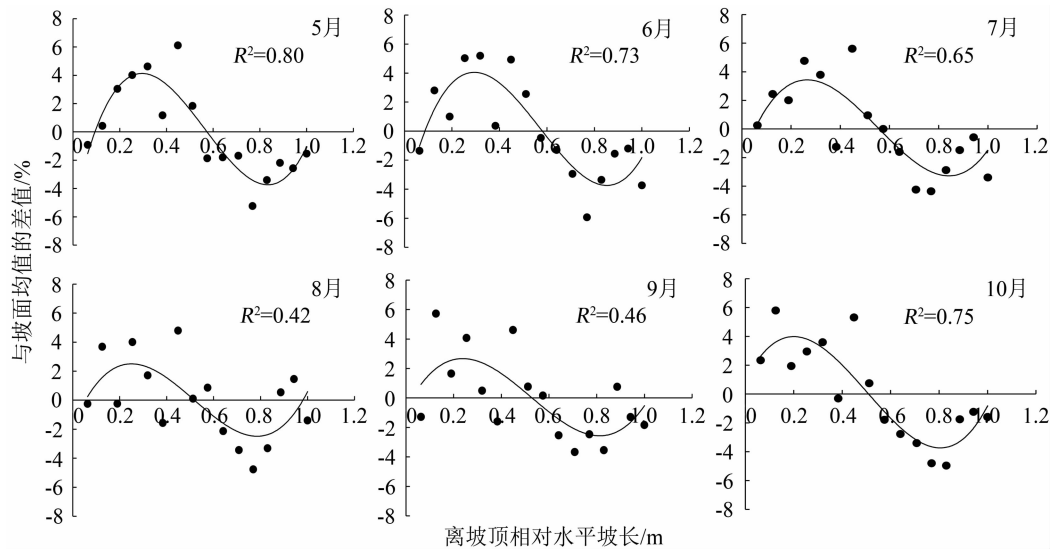


图3 不同月份0~100 cm 土层土壤质量含水量与坡面均值差值随离坡顶水平距离的变化

Fig.3 Variations of difference between massive soil moisture in 0~100 cm soil layer of plot and slope average along relative horizontal distance in different months

表3 坡面土壤质量含水量预测值精度的两种方法比较(单位:%)

Tab. 3 Comparison of predicted accuracy between two methods (Unit: %)

方法		5月26日	6月15日	7月2日	8月13日	9月16日	10月1日
土壤含水量的坡面均值测定值		33.39	32.24	33.60	30.33	31.05	30.75
代表性样地 (8号样地)	预测值	30.95	31.28	33.27	27.86	30.65	27.00
	相对误差	7.3	3.0	1.0	8.1	1.3	12.2
样地-坡面 关系式	预测值	31.76	32.09	33.90	28.20	31.45	27.06
	相对误差	4.9	0.5	0.9	7.0	1.3	12.0

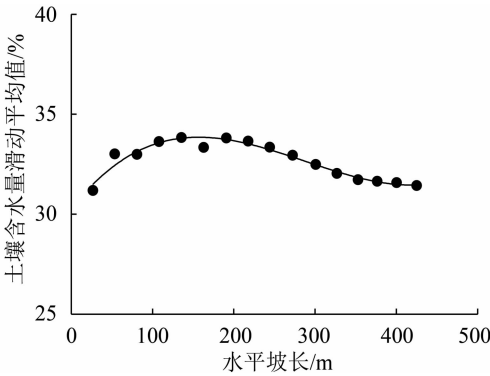


图4 整个生长季0~100 cm 土层土壤质量含水量滑动平均值随水平坡长增加的变化  
Fig.4 Variation of moving average of massive soil moisture in 0~100 cm soil layer during the whole growing season along horizontal distance from slope top

生长季各月土壤质量含水量滑动平均值随水平坡长的增加均表现为先增加后减小的变化趋势,表明各月土壤质量含水量均存在坡面尺度效应,但尺度效应的大小存在差异(图5)。为进一步量化各月土壤质量含水量的空间尺度效应,建立了各月土壤质量含水量的顺坡滑动平均值( $y, \%$ )与水平坡长( $x, m$ )的回归关系,由表4可知,各月的相关系数均较高,且在0.01水平上显著,表明方程具有较高精度,可较为准确的描述坡面土壤质量含水量的空间尺度效应。

3 讨论

3.1 土壤含水量坡面变化的影响因素

土壤含水量变化受多种因素影响,除气象因素

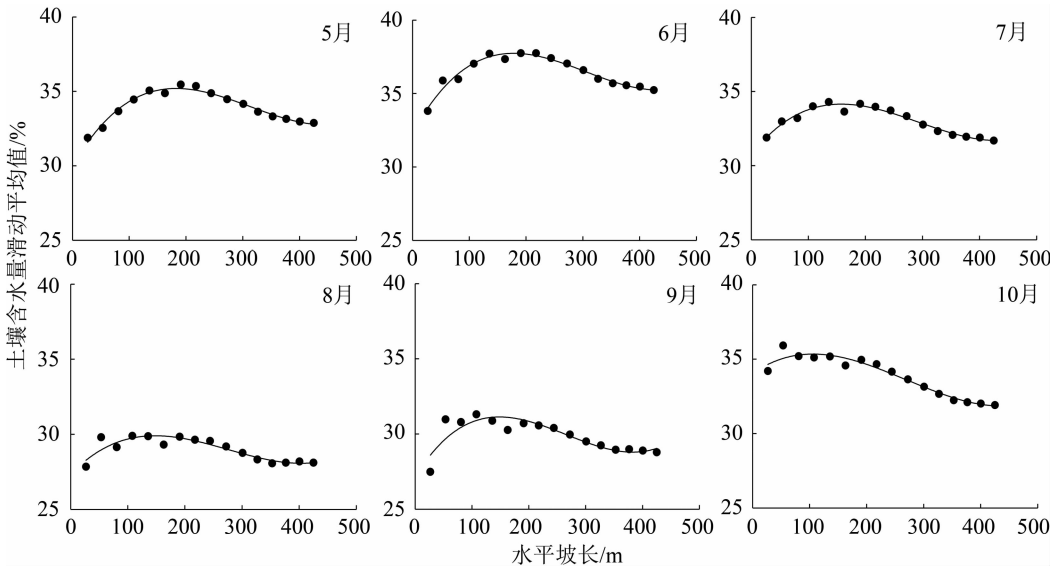


图5 不同月份0~100 cm 土层土壤质量含水量滑动平均值随水平坡长增加的变化  
Fig.5 Variations of moving average of massive soil moisture in 0~100 cm soil layer in different months along horizontal distance from slope top

表4 整个生长季及各月0~100 cm 土层土壤质量含水量滑动平均值与水平坡长的回归关系  
Tab. 4 Regression relations between moving average of massive soil moisture in 0~100 cm soil layer and horizontal slope length in each month and whole growing season

月份	方程	$R^2$	$n$
5	$y = 3 \times 10^{-7} x^3 - 0.0003x^2 + 0.0663x + 29.980$	0.97	16
6	$y = 3 \times 10^{-7} x^3 - 0.0003x^2 + 0.0709x + 32.300$	0.96	16
7	$y = 2 \times 10^{-7} x^3 - 0.0002x^2 + 0.0493x + 30.736$	0.96	16
8	$y = 2 \times 10^{-7} x^3 - 0.0002x^2 + 0.0396x + 27.336$	0.83	16
9	$y = 4 \times 10^{-7} x^3 - 0.0003x^2 + 0.0619x + 27.135$	0.75	16
10	$y = 2 \times 10^{-7} x^3 - 0.0002x^2 + 0.0270x + 34.033$	0.95	16
生长季	$y = 3 \times 10^{-7} x^3 - 0.0002x^2 + 0.0525x + 30.253$	0.94	16

(降水、气温、潜在蒸散等)外,植被类型和生长特征、坡面微地形、土壤物理性质、土地利用管理等的差异均可导致土壤水分空间变化<sup>[12-15]</sup>,在本研究中,由于坡面上均为华北落叶松人工同龄纯林,所以不存在植被类型及土地利用方式差异的影响。植被生长特征及林分结构的差异,会导致植被蒸腾耗水不同,从而影响土壤水分空间分布,特别是在干旱年,土壤水分不足,植被的蒸腾耗水将对土壤含水量坡面变化起主要作用。本研究坡面的树高、胸径、密度及冠层结构均存在明显的坡位差异<sup>[16-17]</sup>,但相关分析发现(表 5),树高、胸径、枯落物层生物量与土壤含水量不显著相关,叶面积指数在 6—8 和 10 月份与土壤含水量分别呈显著正相关和显著负相关,乔灌木生物量在 6—9 月份与土壤含水量呈显著正相关,这表明植被蒸腾耗水不是影响研究坡面土壤水分坡位差异的最主要原因。进一步分析发现,研究期间(生长季)降水量 548 mm,平均土壤含水量为 31.4%,为田间持水量(38.0%)的 82.6%,即研究年份为平水年,较多降水导致植被蒸散耗水影响相对较小。海拔差异导致气象因素坡位差异也会影响土壤水分空间分布,虽然本研究中各月土壤含水量与海拔均呈不同显著程度的正相关,但本研究坡面高差有限,气象因素坡位差异不应成为主要影响因素。与坡度和土壤水文物理性质的相关分析表明,土壤含水量和坡度相关不显著,而与土壤总孔隙度、持水能力各月都显著正相关,这表明在研究年份降水相对充足条件下,土壤持水性能的坡位差异是导致该坡面各月土壤含水量时空变化格局的主要原因。这与王政权等<sup>[18]</sup>在东北湿润地区的阔叶红松林坡面研究得出的土壤水分空间变异与容重、毛管

持水量和孔隙度的空间变异密切相关的结论基本一致。

3.2 土壤含水量坡面尺度效应

先前在本研究坡面上进行的研究表明,森林的地上生物量、叶面积指数及树高、胸径等生长指标均存在一定的坡位差异,表现为坡中部生长较好,且随空间尺度的增大(水平坡长增大),均存在坡面尺度效应<sup>[16-17,19]</sup>。本研究发现,林地土壤含水量同样也有坡面尺度效应,并在生长季内各月随水平坡长增加的变化趋势基本一致,且均与土壤孔隙度和持水能力存在显著相关,进一步分析发现,土壤孔隙度及持水能力均有明显的坡位差异,且与土壤含水量的沿坡变化基本一致(图 6),因此,土壤持水性能的沿坡变化对土壤含水量的坡面尺度效应具有重要影响。这不难想象,虽然研究坡面植被的生长及林分结构存在差异,但由于研究年份为平水年,降水相对较多,植被蒸散耗水对土壤水分空间格局的影响相对较小,使得土壤含水量的空间格局主要决定于土壤的持水特征。

本研究发现,土壤含水量的坡面尺度效应大小存在月份差异,这是因为,如同已有研究<sup>[13,20-22]</sup>所表明的,降雨输入、蒸散输出以及坡面汇流均存在月份变化,这必然导致土壤水分空间变异程度的差异。由于研究坡面的高差相对不大,不同坡位的降雨输入不会差别很大,因此,蒸散输出和坡面汇流很可能是导致土壤水分坡面尺度效应月份差异的主要原因,但还需进一步研究验证并量化不同因素的贡献。

3.3 不同坡位样地的坡面代表性

为尽量准确估计坡面土壤水分,考虑到土壤水分的坡面时空变异,需在不同坡位布设大量监测点,

表 5 研究坡面样地 5—10 月 0~100 cm 土层质量含水量与植被、地形及土壤因子的相关系数  
Tab. 5 Correlation of soil moisture in 0~100 cm soil layer in different months at the slope plots  
with factors of vegetation, topography and soil physical properties

月份	海拔	坡度	容重	持水能力	总孔隙度	密度	叶面积指数	枯落物生物量	乔灌木生物量	树高	胸径
5	0.61 *	-0.48	-0.32	0.58 *	0.52 *	-0.08	0.46	0.29	0.40	0.13	0.35
6	0.63 * *	-0.39	-0.38	0.64 * *	0.64 * *	-0.03	0.53 *	0.32	0.51 *	0.18	0.35
7	0.66 * *	-0.29	-0.34	0.56 *	0.56 *	0.06	0.63 * *	0.41	0.59 *	0.19	0.38
8	0.43	-0.02	-0.43	0.54 *	0.57 *	0.24	0.61 *	0.27	0.61 *	0.02	0.20
9	0.55 *	-0.08	-0.39	0.51 *	0.50 *	0.12	-0.09	0.34	0.54 *	0.06	0.32
10	0.73 * *	-0.27	-0.47	0.67 * *	0.67 * *	0.06	-0.64 * *	0.42	0.38	-0.04	0.38

注: \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。

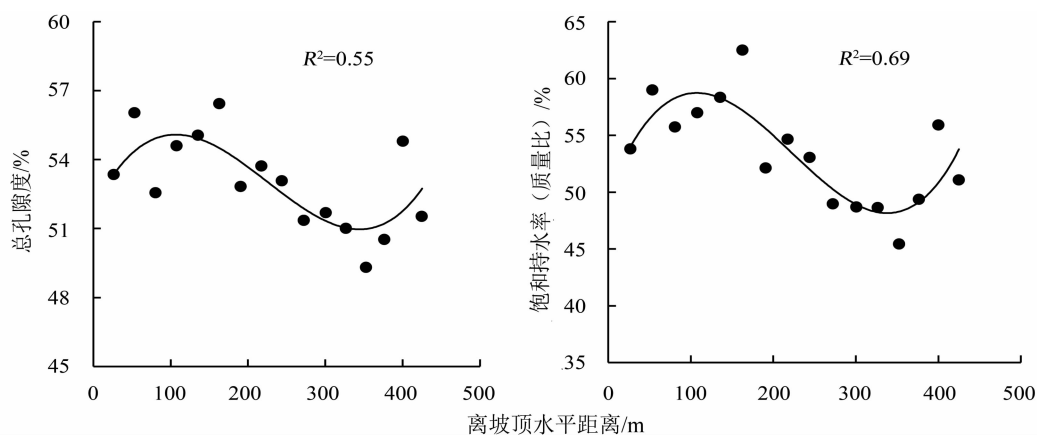


图6 0~100 cm 土层土壤孔隙度和持水能力随离坡顶水平距离的变化

Fig. 6 Variations of soil porosity and saturated water-holding rate in 0~100 cm soil layer along horizontal distance from slope top

这必然导致工作量很大,难以在实际中实施,故而往往是基于有限的典型样地监测值来推求坡面均值。但是,如何选择典型样地?如何由典型样地监测值上推获得整个坡面的特征值?却一直缺乏足够的科学依据。本研究表明,不同坡位样地土壤含水量的坡面代表性差异很大,且有明显季节变化。因此,推求坡面特征值的可靠性很大程度上取决于典型样地的选择。在黄土高原坡面对土壤水分时间稳定性的研究<sup>[3]</sup>表明,坡面中部及中部偏上的测点可代表整个坡面平均含水量;在澳大利亚泰拉若拉地区的研究<sup>[23]</sup>表明,坡面土壤含水量的代表性测点接近于坡面中部。本研究表明,位于坡中部相对水平坡长0.57处的土壤含水量与坡面均值最接近,可藉此代表坡面均值。这与上述研究结果基本一致,也在一定程度上表明坡面平均土壤含水量的代表性测点可能位于坡面中部附近。为提高利用代表性样地土壤含水量测定值估计坡面平均值的可靠性,本文进一步建立代表性样地土壤含水量与坡面均值的数量关系,由此可更精确地实现从典型样地向整个坡面均值的尺度上推。

## 4 结论

在2015年生长季(5—10月),对六盘山半湿润区香水河小流域一个华北落叶松人工林典型坡面的0~100 cm土层的质量含水量进行了连续监测。研究表明:

(1)土壤质量含水量存在坡位差异,整个生长季的坡面平均值为31.43%,变化范围26.79%~

36.61%,变异系数9.3%。土壤含水量的沿坡变化表现为随水平坡长增加先逐渐升高,在坡中上部(水平坡长109.2 m处)达到最大;之后逐渐降低,在坡面中下部(水平坡长350.4 m处)达到最小;然后又逐渐增加。各月的土壤含水量沿坡变化趋势与生长季平均值的变化趋势相似,但不同月份土壤含水量坡位间差异有所不同。

(2)在研究年份为平水年和降水相对充足的条件下,土壤持水性能的坡位差异是导致土壤含水量坡位差异的主要原因,表现为土壤含水量与土壤孔隙度、持水能力显著相关。

(3)土壤质量含水量存在明显的坡面尺度效应,且其大小在不同坡段有所差异,在整个生长季,坡面尺度效应在坡段0~156.3 m内为+2.06%/100 m,在坡段156.3~425.1 m内为-0.90%/100 m。生长季内各月的土壤含水量坡面尺度效应的变化趋势基本一致,但数值大小存在不同。

(4)土壤含水量的坡面均值的最佳代表性样地位于坡面中部相对水平坡长0.57处,可用此样地的土壤含水量测定值代表坡面均值,并可利用代表性样地土壤含水量与坡面均值的统计关系,更精确地上推估计土壤含水量的坡面均值。

## 参考文献(References)

- [1] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072
- [2] CHOI M, JACOBS J M. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(4): 883-896
- [3] JIA Y H, SHAO M A. Temporal stability of soil water storage under



- four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **117**: 33 – 42
- [4] HU W, SHAO M A, WANG Q J, et al. Time stability of soil water storage measured by neutron probe and the effects of calibration procedures in a small watershed[J]. *Catena*, 2009, **79**(1): 72 – 82
- [5] 王信增, 焦峰, 刘源鑫, 等. 不同空间尺度土壤水分与环境因素的关系[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(2): 319 – 323 [WANG Xinzeng, JIAO Feng, LIU Yuanxin, et al. Relationships between soil moisture and environmental factors at different spatial scales [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 319 – 323]
- [6] ENTIN J K, ROBOCK A, VINNIKOV K Y, et al. 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics [J]. *Journal Geophysical Research*, **105** (D9): 11865 – 11877
- [7] BROCCA L, TULLO T, MELONE F, et al. Catchment scale soil moisture spatial – temporal variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422 – 423: 63 – 75
- [8] 王存国, 韩士杰, 张军辉, 等. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(4): 849 – 855 [WANG Cunguo, HAN Shijie, ZHANG Junhui, et al. Spatial heterogeneity of surface soil moisture in a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains based on geostatistic analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(4): 849 – 855]
- [9] 王彬, 于澎涛, 王顺利, 等. 祁连山区林地的土壤贮水量坡位响应[J]. *中国水土保持科学*, 2016, **14**(3): 101 – 108 [WANG Bin, YU Pengtao, WANG Shunlin, et al. Response of soil water storage to slope position of forestland in Qilian Mountains [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, **14**(3): 101 – 108]
- [10] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准-森林土壤水分-物理性质的测定[M]. 北京, 中国标准出版社, 2000: 22 – 24 [State Forest Administration. *Forestry industry standard-Analytic method of forest soil* [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 22 – 24]
- [11] 刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山主要植被类型的生物量及其分配[J]. *林业科学研究*, 2011, **24**(4): 443 – 452 [LIU Yanhui, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Biomass and its allocation of the main vegetation types in Liupan Mountains[J]. *Forest Research*, 2011, **24**(4): 443 – 452]
- [12] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, **240**(3 – 4): 243 – 263
- [13] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, **49**(4): 723 – 750
- [14] YOO C, KIM S. EOF analysis of surface soil moisture field variability [J]. *Advances in Water Resources*, 2004, **27** (8): 831 – 842
- [15] WANG Z Q, LIU B Y, ZHANG Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, **19**(6): 707 – 718
- [16] 王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 等. 六盘山南坡华北落叶松人工林冠层 LAI 的坡面尺度效应[J]. *生态学报*, 2016, **36**(12): 3564 – 3571 [WANG Yunni, DENG Xiuxiu, WANG Yanhui, et al. The slope scale effect of canopy LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation at the south side of Liupan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(12): 3564 – 3571]
- [17] 邓秀秀, 王云霓, 王彦辉, 等. 华北落叶松人工林树高和胸径的坡位差异与坡面尺度效应—以六盘山香水河小流域为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, **36**(5): 121 – 128 [DENG Xiuxiu, WANG Yunni, WANG Yanhui, et al. Slope variation and scale effect of tree height and DBH of *Larix principis-rupprechtii* plantations along a slope: a case study of Xiangshui watershed of Liupan Mountains [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(5): 121 – 128]
- [18] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. *生态学报*, 2000, **20**(6): 945 – 950 [WANG Zhengquan, WANG Qingcheng. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6): 945 – 950]
- [19] 王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山香水河小流域华北落叶松人工林乔木层生物量的坡面变化和尺度效应[J]. *林业科学研究*, 2015, **28**(5): 701 – 707 [WANG Yunni, DENG Xiuxiu, WANG Yanhui. The variation of biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation along slopes and its scale effect in the Xiangshuihe watershed of Liupan Mountains of China, Ningxia [J]. *Forest Research*, 2015, **28**(5): 701 – 707]
- [20] 段亮亮, 满秀玲, 刘玉杰, 等. 大兴安岭北部天然落叶松林土壤水分空间变异及影响因子分析[J]. *北京林业大学学报*, 2014, **36**(4): 36 – 41 [DUAN Liangliang, MAN Xiuling, LIU Yujie, et al. Soil moisture spatial variability and affecting factors of natural larch forest in northern region of Daxinganling Mountains of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, **36**(4): 36 – 41]
- [21] WESTERN A W, BLÖSCHL G, GRAYSON R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**(1 – 2): 20 – 37
- [22] SCHUME H, JOST G, KATZENSTEINER K. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)-European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand [J]. *Geoderma*, 2003, **112**(3 – 4): 273 – 287
- [23] GRAYSON R B, WESTERN A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **207**(1 – 2): 68 – 82

# Spatial-temporal Variations and Scale Effect of Soil Moisture on *Larix Principis-ruprechtii* Plantation Slope in Semihumid Liupan Mountains, China

LIU Zebin, WANG Yanhui<sup>\*</sup>, XU Lihong, DENG Xiuxiu, TIAN Ao

(Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration,  
Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Soil moisture is a key factor driving a series of hydrological and biological processes. Since the influences of meteorological, topographical, soil and vegetation factors, the soil moisture often shows an obvious difference among slope positions and a spatial scale effect. This should be deeply understood and accurately quantified, to provide a scientific basis for the precise forest management and the representative plot selection in eco-hydrological studies. In this study, a representative slope covered by 34-year-old *Larix principis-ruprechtii* plantation and with a horizontal length of 425.1 m was selected in the small watershed of Xiangshuihe of Liupan Mountains. A 30 m wide survey transect was set up on the whole slope and it was evenly divided into 16 continuous plots. The soil moisture within 0 ~ 100 cm soil layer was measured from May to October of 2015. The variation of soil moisture with rising slope length (i. e. , the horizontal distance from the slope top) in different months was analyzed. The results showed: (1) there was a remarkable soil moisture variation along the slope. For the whole growing season, the variation of soil moisture with rising slope length showed a trend of firstly a gradual increase, reaching its maximum at the middle-upper slope position (at the horizontal slope length of 109.2 m), and thereafter a gradual decrease, reaching its minimum at the middle-lower slope position (at the horizontal slope length of 350.4 m), and then an increase again. The variation trend of soil moisture in each month was similar to that of the whole growing season. (2) The soil moisture showed a slope scale effect. i. e. , there was a remarkable variation in the moving average of soil moisture with rising slope length. The variation trend of scale effect of soil moisture was similar in each month, but the amount of scale effect was somewhat different. (3) Under the “normal-year” condition of 2015 with relative rich precipitation, the soil water-holding capacity became the dominant factor to determine the spatial variation pattern of soil moisture on the study slope. A significant correlation was observed in each month among the soil moisture, the porosity and water-holding capacity of soil. (4) The best representative slope position for the whole slope average of soil moisture was found at the middle slope position (corresponding to the relative horizontal slope length of 0.57). Therefore, the observed soil moisture at this slope position can be simply viewed as the slope average, or can be used for a more accurate estimation of the slope average of soil moisture using the statistic relation developed in this study. Based on the results of this study, it can be said that the whole slope average of soil moisture can be accurately estimated using the soil moisture at representative slope position.

**Key word:** Liupan Mountains; *Larix principis-ruprechtii*; slope; soil moisture; spatial-temporal variation; slope scale effect