

六盘山华北落叶松人工林土壤水分空间异质性的 降雨前后变化及其影响因素

刘宇^{1,2}, 王彦辉², 郭建斌¹, 刘泽彬², 张桐^{1,2}, 邓秀秀^{2,3}, 徐丽宏², 左海军²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 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; 3. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要: 为了阐明林冠叶面积指数、枯落物厚度等植被因子及降雨量影响下的林地土壤水分空间异质性变化规律,在宁夏六盘山香水河小流域选择了2个35 a华北落叶松典型坡面(东南坡A、南坡B),遵循空间格局分析的小支撑、多样点设计原则,结合所选坡面特征,利用线状样带取样法,测定了坡面上各样点的表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)土壤水分、林冠叶面积指数、枯落物层厚度、坡度及离开最近一棵树主干的距离,采用经典统计结合地统计学方法,分析了降雨前后土壤水分空间变异特征;利用Pearson相关分析法分析了降雨前后坡面土壤水分与主要环境因子的数量关系;经Kriging插值得到了实验坡面降雨前后的土壤水分空间分布图。结果表明:本研究选择的2个坡面上表层和亚表层土壤水分均存在显著的空间自相关性,呈现明显的斑块状分布格局。A、B坡面雨前表层土壤水分的块基比分别为0.20和0.16,有强烈的空间自相关性;亚表层的块基比均为0.50,具有中等的空间自相关性;表层土壤水分变程分别为27.6 m和23.7 m,亚表层土壤水分变程为54.9 m和186.0 m,空间自相关性存在于较大的范围内。降雨后A、B坡面的表层土壤水分的块基比分别为0.13和0.11,亚表层的块基比为0.28和0.20;表层土壤水分变程分别为17.7 m和17.3 m,亚表层土壤水分变程为31.4 m和42.6 m,空间自相关性存在的范围变小。Pearson相关分析表明,A坡面土壤水分的空间变化在雨前主要受样点离开树木的距离和坡度的影响,雨后则主要受样点上方叶面积指数和枯落物厚度的影响。由此可见,此次11 mm降水使2个坡面上土壤水分的空间异质性增加、空间自相关性增强,且乔木林冠层和枯落物层对降雨的截持和再分配是雨后土壤水分空间异质性增大的主要原因。

关键词: 华北落叶松; 土壤水分; 地统计学; 空间异质性; 降雨

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0197-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.033

Variation and Main Influencing Factors of Spatial Heterogeneity of Soil Moisture of *Larix principis-rupprechtii* Plantation Before and After Raining in Liupan Mountains of Ningxia, China

LIU Yu^{1,2}, WANG Yanhui², GUO Jianbin¹,

LIU Zebin², ZHANG Tong^{1,2}, DENG Xiuxiu^{2,3}, XU Lihong², ZUO Haijun²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of

Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration

Beijing 100091; 3. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: Two typical slopes of 35-year-old *Larix principis-rupprechtii* plantation (southeast slope A and south slope B) were chosen to be studied in order to elucidate the spatial characteristics of soil moisture under the influence of rainfall and vegetation factors such as canopy leaf area index and litter layer thickness in forest land. Following the principles and methodology of spatial pattern analysis in geostatistics, and took the characteristics of the selected slopes into consideration, the linear sampling method were chosen to measure the moisture of surface (0—20 cm) and subsurface (20—40cm) soil, canopy leaf area index, litter layer thickness, slope degree and distance from the nearest tree trunk. The spatial variation characteristics of soil moisture before and after raining were analyzed combining with classical statistics and geostatistics methods,

收稿日期: 2016-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41390461, 41230852, 41471029)

第一作者: 刘宇(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态水文、水土保持研究。E-mail: liuyu@bjfu.edu.cn

通信作者: 郭建斌(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: jianbinguo@bjfu.edu.cn

the relationship between soil moisture and the main environmental factors before and after raining were analyzed using the Pearson correlation analysis, the spatial distribution of soil moisture before and after raining on the slopes was obtained by Kriging interpolation. Result indicated that there was significant spatial autocorrelation of soil moisture of surface and subsurface layer on both selected slopes. In addition, the soil moisture presented an obvious patchy distribution pattern. Before raining, structural ratio of surface soil water content were 0.20 and 0.16 respectively on slope A and B, indicated that soil moisture of surface layer had a strong level of spatial autocorrelation selected slopes. Meanwhile, the structural ratio of subsurface soil water content was 0.50 on both slope, soil moisture of subsurface layer indicated medium level of spatial autocorrelation on both chosen slopes. The range of the autocorrelation functions of surface soil moisture on slope A and B was from 27.6 m to 23.7 m, and the range of subsurface soil moisture was from 54.9 m to 186.0 m respectively, manifested that spatial autocorrelation of the soil moisture existed in a large range. After raining, the structural ratio of surface soil water content were 0.13 and 0.11 on slope A and B, the ratio of subsurface were 0.28 and 0.20 respectively, the range of the autocorrelation functions of surface soil moisture was from 17.7 m to 17.3 m, and the range of subsurface was from 31.4 m to 42.6 m respectively. Those results indicated a shrinking trend of the range of spatial autocorrelation after rainfall. Pearson correlation analysis revealed that before rainfall, the distance from the nearest tree trunk and litter layer thickness made the main impact factors of the spatial variation of soil moisture on slope A. However, canopy leaf area index and litter layer thickness became more significant variables after raining. So, this precipitation process (11 mm of rainfall amounts) increased the spatial heterogeneity and autocorrelation of soil moisture, in addition, the interception and redistribution of rainfall caused by the tree canopy and litter layers was the main reason of the increase of the soil moisture spatial heterogeneity in the study area.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii*; soil moisture; geostatistics; spatial heterogeneity; rainfall

土壤水分是土壤的重要状态参数和时空连续变异性^[1],受自然和人为多重因素的复杂影响而有着高度的空间异质性,并因此而对土壤—植被—大气传输体中的物质运移和水土过程有着重要影响^[2],从而也影响着树木生长和森林多种服务功能,因而日益受到重视。

地统计学能有效描述变量的空间分布和变异特征,还可有效解释空间格局对生态过程与功能的影响^[1]。由于土壤水分空间分布的高度复杂性,国内外学者近些年日益注重应用地统计学方法开展研究,如 Brocca 等^[3]在意大利中部小流域进行了土壤水分周期性采样并研究了表层和亚表层土壤水分变异规律;Feng 等^[4]在黄土高原研究坡面土壤水分空间异质性的尺度变化,分析了不同尺度下土壤水分空间变异的主导因素;余冬立等^[5]在陕西神木黄土区的小流域内研究土壤水分空间异质性时发现,在土壤含水量斑块高低镶嵌格局下会产生较少的地表径流,并提出可通过能提高土壤水分空间异质性的土地利用方式改变而实现减少地表径流和控制土壤侵蚀。

土壤水分空间变异受诸多因素影响且主要影响因素会随环境条件而变,如张继光等^[6]在桂西北喀斯特坡地利用 DCCA 法分析后发现有机碳含量、土地利用方式和裸岩率是最重要的影响因素;付同刚等^[7]认为,土壤理化性质是喀斯特地区小流域土壤含水率的直接影响因素;Cantón 等^[8]在西班牙半干旱区的

研究表明地表植被是土壤水分空间分布的最重要因素,甚至可一定程度地掩盖地形因子的影响;Feng 等^[4]则认为,土壤水分空间分布的主要影响因子随研究尺度而变,在小流域尺度主要是土地利用类型和坡度,在流域尺度则主要是坡位和植被盖度。

近年来,国内学者采用地统计学方法集中在西南喀斯特山区^[6-7,9-10]和西北黄土高原沟壑区^[5,11]研究了土壤水分空间分布,研究对象多为农田^[6]、草地^[1,12]、农草混合地^[5],但在北方山地针对森林土壤水分开展的研究还很少;作为土壤水分的主要来源,降水输入对土壤水分空间变异有着最基础性的重要影响,尽管对此已有研究报道^[1,6],但多止步于对降雨前后的土壤水分空间异质性变化的描述,对引发其改变的机理鲜有探讨。林地具有比农田和草地更复杂的冠层和地表覆被变化,增大了降水输入和蒸发的空间变异,不同时间段的土壤水分空间变异会呈现与其他土地利用类型不同的规律,将其变化过程和影响因子相结合来研究,可更好地掌握森林土壤水分的空间分布规律并进行变化预测。

本文在地处半湿润半干旱区过渡带的黄土高原中西部的宁夏六盘山林区,以当地主要造林树种华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 为研究对象,选择典型坡面,研究森林土壤的水分空间变异及对降雨的响应,并甄别主要影响因素,以期深入认识林地

土壤水分空间变异规律,并为林水综合管理、流域综合治理和森林多功能经营等提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于宁夏固原市泾源县六盘山自然保护区内的香水河小流域,其面积为 43.74 km²,地理位置为东经 106°12′10.6″—106°16′30.5″,北纬 35°27′22.5″—35°33′29.7″,海拔范围 2 040~2 942 m;年均气温 5.8 ℃,年均空气湿度 60%~70%;年均降水量 600~820 mm,集中在 7—9 月。土壤类型主要为山地灰褐土,石砾含量较高,母岩为石灰页岩和红色沙岩。属暖温带落叶阔叶林区,主要地带性植被为落叶阔叶林和草甸草原。主要乔木树种为华北落叶松、华山松 (*Pinus armandii*)、山杨 (*Populus davidiana*)、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、红桦 (*Betula albosinensis*) 和油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr) 等;主要灌木为沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、刺五加 (*Eleutherococcus giraldii*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等;主要草本植物包括苔草 (*Carex spp*)、蕨 (*Pteridium aquilum*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、东方草莓 (*Fragaria orientalis*) 等。

1.2 取样及测量方法

依据坡面完整、坡度相对均匀、林分起源和经营历史相似的原则,在研究区内选择 2 个 35 a 的华北落叶松中龄人工林典型坡面,其中 A 坡为东南坡,斜坡长为 200 m,平均坡度 32.3°,海拔范围 2 300.7~2 402.6 m,现存林木密度为 925 株/hm²;B 坡为南坡,斜坡长 480 m,平均坡度 33.7°,海拔范围 2 276.7~2 524.5 m,现存林木密度为 891 株/hm²。坡面土壤为山地灰褐土,土层厚度均为 1 m 以上。在所选坡面上,采用线状样带取样^[2],在 A 坡沿坡横向自左向右选择 5 条 200 m 长的纵向样带,样带间距 7.5 m;在每条样带上自坡脚至坡顶,每隔 25 m 布设 1 个取样点,5 条样带共设取样点 45 个;在 B 坡沿坡横向自左向右选择 3 条 450 m 长的纵向样带,样带间距 15 m;在每条样带上自坡脚至坡顶,每隔 30 m 布设 1 个取样点,3 条样带共设取样点 48 个(图 1)。

取样在雨前和雨后各进行 1 次,用内径 3.5 cm 的土钻在每个取样点分两层(0—20 cm,20—40 cm)取样,在 2 个坡面同时进行,用烘干法(105 ℃)测定土壤含水率。选定 2015 年 8 月 25 日—9 月 4 日为干旱测定时段,此前的最后一次降雨为 8 月 11 日,次降雨量 24 mm,之后连续 14 天无雨,使土壤含水量降到较低水平;直到 9 月 4 日的雨量 11 mm 的一次降雨;在 9 月 5 日进行雨后取样。在土壤取样的同时,在 A 坡上用罗盘测定各取样点的坡度,用米尺测

量各取样点离最近一棵树的距离,用卷尺测量取样点周围 0.5 m 范围内的枯落物层平均厚度,用 LAI-2200 冠层分析仪(LI-COR,美国)测量取样点正上方的叶面积指数(leaf area index, LAI)。

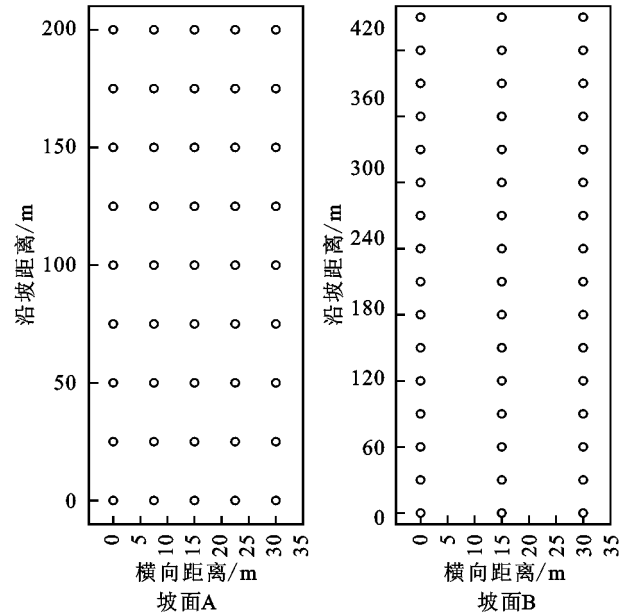


图 1 坡面取样点布设示意图

1.3 分析方法

用经典统计学方法和地统计学方法,对样本数据进行分析,采用 R 软件进行土壤水分的描述性统计分析和 Pearson 相关分析,土壤水分的空间自相关分析、半方差函数拟合、Kriging 空间局部插值等均用专业地统计学软件 GS+7.0 完成。

空间自相关分析广泛用于生态学研究,用于检验空间变量是否存在空间依赖关系^[7],本文采用常用的 Moran's *I* 系数进行空间自相关分析:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中: x_i 和 x_j 分别是空间变量在相邻配对空间点 i 和 j 上的取值; w_{ij} 为相邻权重,即点对 i 与 j 间距离的倒数; n 为空间单元总数; I 取值介于-1~1 之间,当 $I=0$ 时代表空间不相关,正值为正相关,负值为负相关。

在地统计学理论中,半方差函数是应用最广泛的空间格局描述工具^[1],可表达为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数值; h 为两样本间的距离; $Z(x_i)$ 为区域化变量 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为 h 处的样点实测值; $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样本对数。一般认为半方差函数仅在最大间隔距离的 1/2 内才有意义^[1,9],因此本研究中的有效滞后距均设为取样点最大间隔距离的 1/2。

通过半方差函数公式计算半方差函数值 $\gamma(h)$,由 $\gamma(h)$ 对 h 作散点图可得半方差函数图,根据残差最小原则拟合最优理论模型,通过最优模型和半方差函数图中的块金值(C_0)、基台值($C+C_0$)、变程(a)、块基比($C_0/(C_0+C)$)等参数特征来分析变量的空间变化规律。

利用空间 Kirging 插值法绘制土壤水分的空间格局图。Kriging 插值法^[12]是一种最优无偏线性估值方法,对于空间变量在点 x 处的估计值 $Z'(x)$,可通过该点影响范围以内的 n 个实测值 $Z(x_i)$ 的线性组合得到,即:

$$Z'(x)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)$$

式中: λ_i 是实测值 $Z(x_i)$ 的权重,表示各观测值对估计值 $Z'(x)$ 的贡献,在保证估值无偏性和最优性的条件下,可由变量的半方差函数计算得到,所有实测值权重之和为 1。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的描述性统计特征

由表 1 可知,在 A 坡上,表层(0—20 cm)土壤含水量略高于亚表层(20—40 cm),但二者差异并不显

著,B 坡在同一时段的表层土壤含水量则明显低于亚表层;两个坡面上雨后土壤表层和亚表层水分平均值均较雨前升高,且 A 坡土壤含水量增幅大于 B 坡。这可能是由于 B 坡为阳坡,太阳辐射较 A 坡更为强烈,导致雨后土壤水分尤其是表层水分的蒸发量更大;但更可能是由于作为阳坡的 B 坡面的土壤中石砾含量较高,导致其持水能力较弱,这可从其非常低的最小含水量上看出来。变异系数(CV)反映了土壤水分的离散程度,两次测量均呈现中等强度变异($10\%<CV<100\%$),但除了 B 坡亚表层外,雨后表层和亚表层土壤水分变异系数均较雨前增大,说明降雨事件一定程度上强化了土壤水分变异程度。

为了防止半变异函数的计算过程中产生“比例效应”^[13],需保证数据符合正态分布,由于样本容量 <50 ,因此采用 Shapiro-Wilk 法对样本数据的正态性进行检验,结果表明,在 5%的检验水平下,A 坡面雨前表层和雨后亚表层的土壤水分数据为近似正态分布,需经对数转换才可进行地统计学分析,其他数据均服从正态分布,可直接进行半方差函数的计算。

表 1 六盘山华北落叶松坡面土壤水分描述性统计结果

坡面	测定时间	深度/cm	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差	变异系数	峰度系数 Kurtosis	偏度系数 Skewness	分布型
A	雨前	0—20	21.38	17.93	28.23	2.45	11.46	0.49	0.91	N#
		20—40	21.33	15.92	26.36	2.38	11.16	−0.56	0.05	N
	雨后	0—20	29.28	16.97	38.63	4.70	16.05	−0.09	−0.59	N
		20—40	28.00	18.17	34.89	4.58	16.36	−0.49	−0.60	N#
B	雨前	0—20	21.56	3.30	36.70	5.95	27.59	1.48	−0.32	N
		20—40	24.00	4.30	45.30	6.98	29.08	1.61	−0.10	N
	雨后	0—20	22.01	4.90	39.00	6.13	27.85	1.52	−0.45	N
		20—40	24.53	5.50	40.90	6.55	26.70	1.23	−0.55	N

注:N 代表正态分布,N# 代表近似正态分布。

2.2 土壤水分的空间自相关分析

由图 2 可知,对于 A 坡面,在雨前时段,滞后距较小的点对均呈现较显著的空间正相关,随着两点间距离的增加,其正相关性逐渐降低,并逐渐向负方向增长;当两点相距 45 m 后,呈现显著的空间负相关;随着滞后距的继续增加,两点的空间自相关系数再次增至正值。雨后的各层土壤水分自相关变化趋势与雨前相似,两点间滞后距较小时,系数值为正,在间距 25 m 左右时系数值为负,随着滞后距的进一步增加,点对间再次变为空间正相关。对于 B 坡面,Moran’s I 系数随着点对距离的增大在 0 附近震荡变化,没有明显的规律性,这是由于阳坡强烈的太阳辐射使得土壤水分的空间自相关性变得更加复杂,对于这一点还需要进一步研究。

2.3 土壤水分的半方差函数分析

对不同测量时段的各层土壤水分半方差函数进行拟合,发现 A 坡面雨后亚表层和 B 坡面雨后表层

土壤水分可较好地拟合成球状模型,其余各层可较好地拟合成指数模型(表 2、图 3)。

块金值 C_0 表示随机变异的大小,主要源于最小取样间隔以内的变量变异性及测量误差,较大的块金值表明小尺度的一些生态过程不容忽视;基台值 C 表示系统内的最大变异程度,基台值越大,表示总的空间异质性程度越高^[12];块基比 $C_0/(C_0+C)$ 代表块金值占总变异的大小,反映了变量的空间依赖性,可以用来衡量变量的空间自相关程度,一般认为^[1],块基比越小,变量的空间自相关性越强,当块基比 <0.25 时,空间变量有强烈的空间自相关性;块基比在 $0.25\sim0.75$ 时,空间变量有中等强度的空间自相关性;块基比 >0.75 时,空间变量有较弱的空间自相关性。在本研究中,A、B 坡面雨前各层土壤水分的块基比在 $0.16\sim0.50$ 之间,雨后的块基比在 $0.11\sim0.28$ 之间,各层土壤水分的块基比均较雨前有所降低。

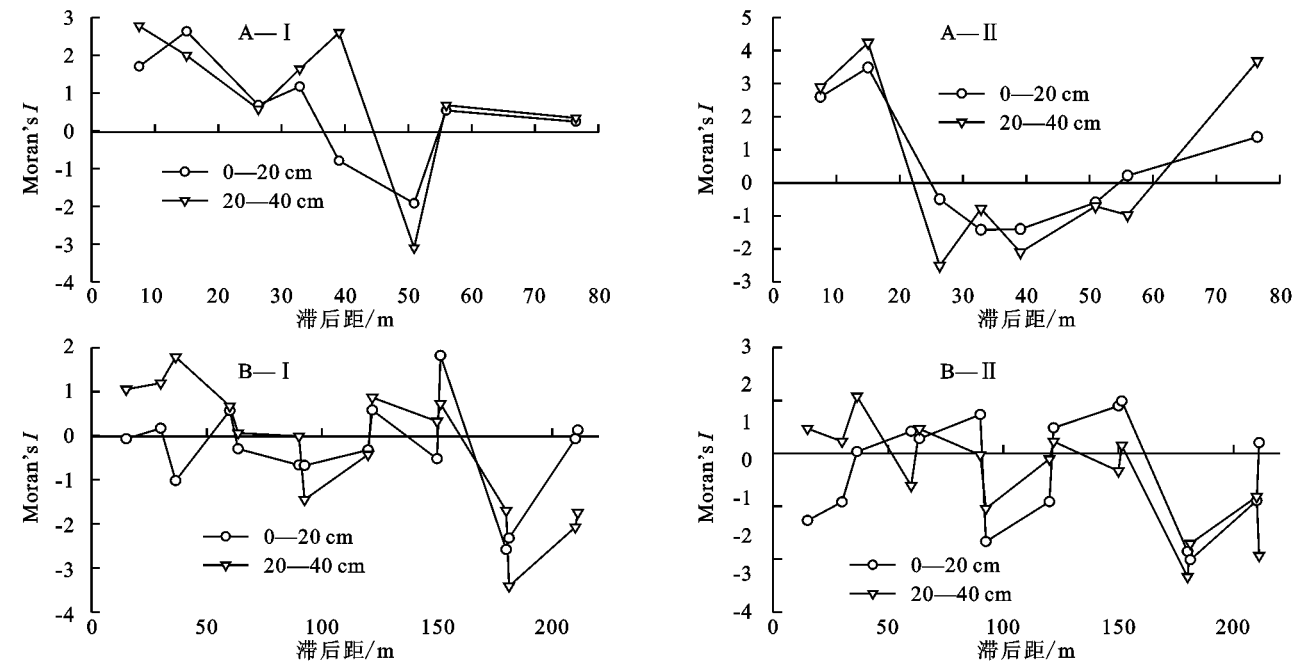


图 2 A、B 坡面雨前(I)和雨后(II)土壤水分空间自相关图

表 2 六盘山华北落叶松坡面土壤水分半方差函数模型及参数

坡面	采样时间	深度/cm	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程/m	$C_0/(C_0+C)$
A	雨前	0—20	指数	0.0025	0.0125	27.6	0.20
		20—40	指数	2.7910	5.6140	54.9	0.50
	雨后	0—20	指数	0.0037	0.0288	17.7	0.13
		20—40	球状	0.0091	0.0319	31.4	0.28
B	雨前	0—20	指数	6.2000	37.8800	23.7	0.16
		20—40	指数	30.6100	61.2300	186.0	0.50
	雨后	0—20	球状	4.5000	40.5100	17.3	0.11
		20—40	指数	9.8000	48.0200	42.6	0.20

变程为半方差函数值到达基台值时的取样点间距,代表变量空间自相关范围的大小,当两点的空间距离大于变程后,变量的空间自相关性消失。由表 2 可知,在雨前和雨后两个时段,A 坡面表层土壤水分的变程(27.6 m,17.7 m)均小于亚表层(54.9 m,31.4 m),土壤水分的空间自相关范围随着土层加深而变大,B 坡面也呈现相同的规律。雨后 A、B 坡面各层土壤水分变程均比雨前降低,降幅在 27.00%~77.10%间,说明雨后土壤水分空间自相关范围变小,空间连续性降低。

2.4 土壤水分的空间分布特征

在空间结构分析的基础上,应用普通 Kriging 法绘制出反映雨前和雨后两个时段土壤表层和亚表层水分空间分布格局的等值线图(图 4)。由图 4 可知,试验区土壤水分呈明显的斑块状分布,空间分布差异明显;亚表层土壤水分连续性较好,斑块数量较少,面积较大;表层土壤水分的斑块更破碎,表现出较差的连续性,这也体现在其半方差函数较短的变程上。对比不同时段土壤水分等值线图后可发现,雨后土壤含水量整体升高,同时空间变异程度明显增大,表现为斑块结构更加破碎、斑块面积减小。不同时段各层土壤水分分布总体均表现为坡上部<坡中下部。

2.5 土壤水分含量和空间变化的影响因素

分析 A 坡面上各样点的 LAI、枯落物厚度、坡度、样点距离最近一棵树的直线距离等与土壤水分的关系。对各取样点的 LAI 和枯落物厚度进行半方差函数拟合,发现二者均不能较好的拟合为已知模型,说明在坡面尺度上,LAI 和枯落物厚度不具有较好的空间结构,因此无法对其进行地统计学分析。

Pearson 相关分析的结果(表 3)显示,样点正上方叶面积指数与雨后各层土壤水分呈极显著($P<0.01$)负相关,主要原因是林冠截持损失一般随 LAI 增大而增加,使得林下降雨输入较少;枯落物厚度与雨前表层和雨后亚表层土壤水分呈显著($P<0.05$)负相关,与雨后表层土壤水分呈极显著($P<0.01$)负相关,也是由于枯落物层截留使得输入土壤的降雨减少;样点离最近一棵树的距离与雨前表层水分呈显著($P<0.05$)正相关,与雨前亚表层水分呈极显著($P<0.01$)正相关,主要可能由于林木蒸腾耗水量随离开树干的距离增加而减少;样点坡度与雨前和雨后各层土壤水分均呈负相关,其中与雨前亚表层土壤水分呈显著($P<0.05$)负相关,可能由于坡度大时利于土壤水分顺坡向下流失。

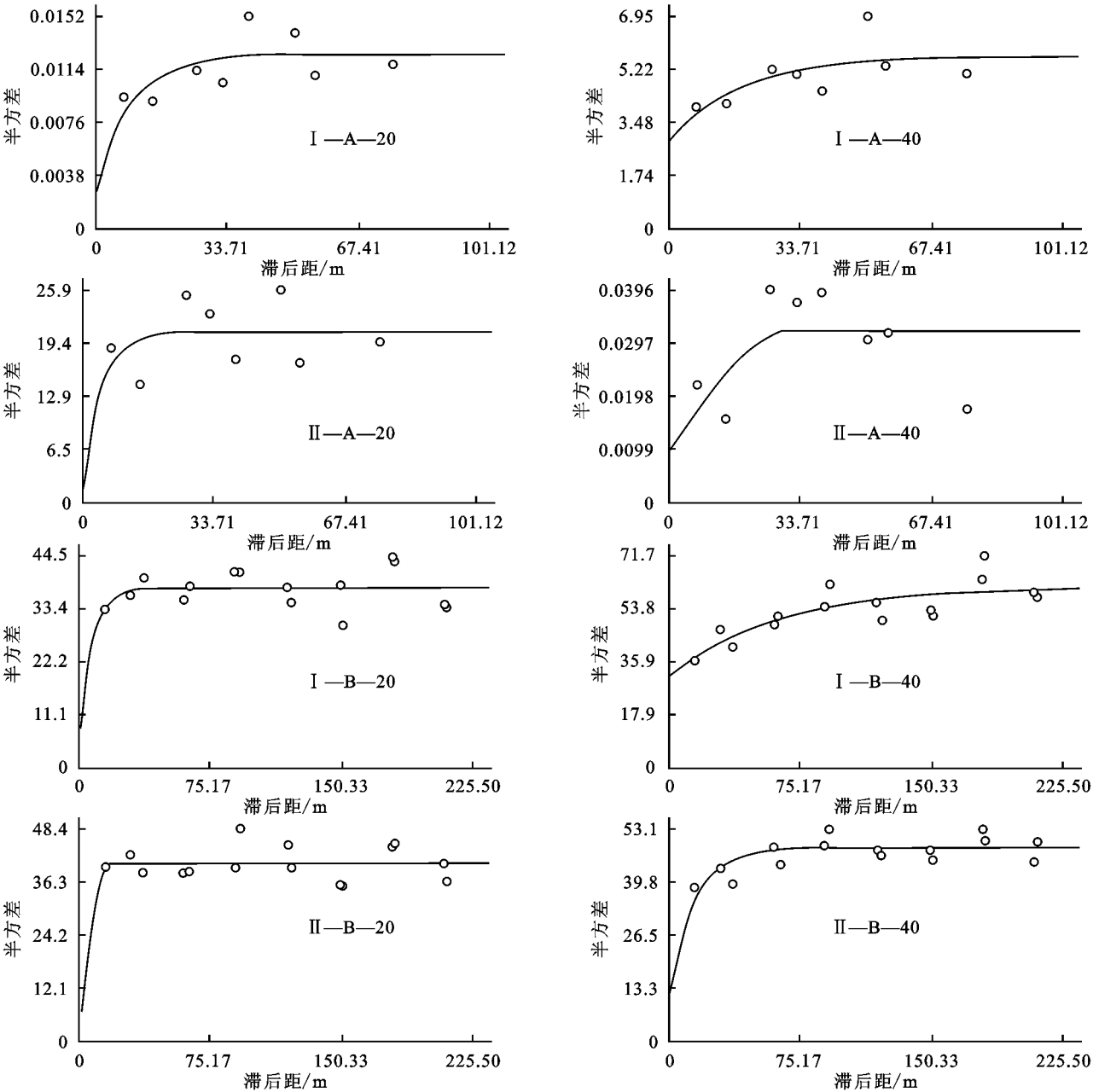


图 3 雨前(I)和雨后(II)A、B坡面土壤水分半方差函数图

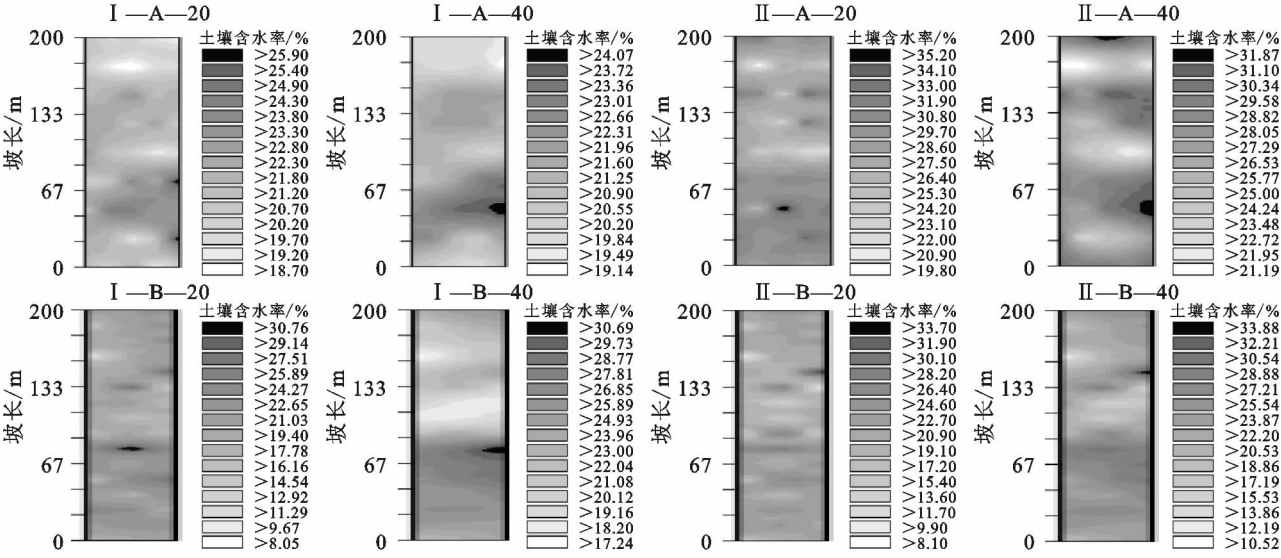


图 4 雨前(I)和雨后(II)土壤表层(A)和亚表层(B)土壤水分的空间分布(0 m 处为坡底)

表 3 土壤水分与环境因子的 Pearson 相关分析

	深度/ cm	叶面积 指数	枯落物 厚度	距最近一 棵树距离	坡度
雨前	0—20	−0.106	−0.291*	0.338*	−0.243
	20—40	−0.101	−0.236	0.512**	−0.261*
雨后	0—20	−0.534**	−0.769**	0.240	−0.221
	20—40	−0.346**	−0.344*	0.093	−0.169

注: ** 相关性在 0.01 水平上显著, * 相关性在 0.05 水平上显著。

3 讨论

虽然在林木和地形的空间分布特征影响下,表层和亚表层土壤水分的变异系数较为接近,但半方差函数表明,不同时段的亚表层土壤水分变程和块基比均大于表层,Kriging 等值线图也反映出土壤亚表层的斑块数目少于表层,这说明亚表层土壤水分具有更好的空间连续性,其空间自相关性存在于更大的尺度范围,呈现出与其他研究地区相似的规律^[1,12]。这一方面是由于具有空间异质性的雨水输入会首先影响土壤表层,受植被和枯落物覆盖及地形影响的林地蒸发也会首先影响土壤表层;一方面是随着土层加深,植被根系尤其是草本层根系减少,土壤中石砾含量增加,增加了对水分影响的随机性。

不同土层雨后土壤水分的变异系数均较雨前有所升高,块基比和变程均减小,对比 A 坡面两个时段的 Moran's I 系数也可以发现,雨后表层和亚表层土壤水分斑块半径(分别为 25 m 和 22 m)均小于雨前的斑块半径(分别为 36 m 和 44 m),表明本次降雨过程没有对土壤水分变异产生平滑作用^[2],相反增加了空间异质性。这是由于各样点上方冠层状况的差异导致降雨过程中接收的穿透雨量不同,从而加大了雨后各样点土壤水分含量的差异。时钟杰等^[14]认为,降雨量越小,林冠枝叶对降雨的截持作用越明显,穿透雨的空间差异就越大。本实验雨后测定时段前的降雨量为 11 mm,林冠层对降雨的截留作用较为明显,因此本次降雨增强了研究区域土壤水分的空间异质性。

Kriging 等值线图显示,坡面土壤水分含量呈现出坡下>坡上的特点,与以往此类研究结果一致^[7],一方面是坡面径流的顺坡运移和土壤水分的再分配的作用结果,另一方面是由于华北落叶松林密度在坡上部比坡中下部小,导致截持和蒸散量较小,土壤含水量较高;同时,土壤水分还受森林空间分布不均匀的影响,尤其是林中空地的影响,如 A 坡面上土壤含水量的峰值并未出现在坡脚,而是位于距坡脚约 40 m 处,而此位置正好是个直径 8 m 左右的林窗。

Pearson 相关分析表明,虽然叶面积指数、枯落物厚度、距离最近一棵树的距离和坡度 4 个环境因子对土壤水分均有一定影响,但其作用的层面和时段有所区别。李振新等^[15]认为,林冠下穿透雨的分布并不是

随机变化的,而是有一定的空间相关性,时钟杰等^[14]对单株华北落叶松林冠穿透雨的空间异质性研究表明,林冠穿透雨和叶面积指数均具有较显著的空间异质性,且叶面积指数与穿透雨的大小具有一定程度的负相关性。由表 3 可知,叶面积指数和枯落物厚度均与土壤水分呈负相关关系,且在雨后相关性更为显著,叶面积指数主要通过影响降雨过程中林内穿透雨的空间分配从而影响土壤水分的空间变异,而枯落物层具有极强的吸持降水能力,枯落物层越厚的样点,最终渗入土壤的降水就越少。这两个因子主要在雨后时段影响土壤水分的变化。取样点距离最近一棵树的距离体现了土壤水分受根系吸水过程影响的程度,一般认为,离树越近,根系越多,土壤水分被树木蒸腾吸收的就越多。结果表明,样点距最近一颗树的距离与土壤水分的关系在雨后并不显著,这是因为降雨过程中产生的树干径流将水分集中在树干附近,因此在雨后一定距离内,距离树干更近的点土壤含水量反而更高,这一现象降低了二者统计学上的相关性,同时本实验在雨后第 2 天即对土壤水分进行测量,在降雨补充土壤水分后,林木蒸腾作用吸收的水量不大,而在雨前干旱时期,根系对土壤中水分长时间的吸收使得二者间的关系更为明显。坡度与土壤水分呈负相关关系,这是因为坡度较陡处的土壤水分更易向坡度较缓处汇聚。样点距离最近一棵树的距离和坡度主要在雨前干旱时段影响土壤水分的变化。值得注意的是,坡度在之前诸多研究^[4-5,7]中被认为是影响土壤水分极为重要的因素,但在本研究中,仅在雨前亚表层表现出与土壤水分显著的相关性,究其原因,在地表有植被覆盖的情况下,包括坡度在内的地形因素易被植被因素所掩盖^[16],在本研究中,叶面积指数等植被因素通过对降雨的再分配作用而影响雨后的土壤水分空间变异,掩盖了坡度和土壤水分间相关关系的显著性;而在雨前时段,华北落叶松根系较强的蒸腾耗水能力也使坡度成为影响土壤水分空间变化的次要因素。

值得提出的是:本文仅对一次降雨前后土壤水分的空间异质性变化进行了分析,鉴于土壤水分变化对降雨响应的复杂性,在本试验基础上针对不同强度、量级的降雨对土壤水分空间异质性的影响展开研究是很有必要的;土壤水分的空间变异存在着明显的尺度效应,建议在后续研究中扩大尺度范围,对小流域乃至流域尺度上土壤水分的空间变异规律进行分析和对比。

4 结论

(1)在宁夏六盘山华北落叶松典型坡面上,降雨前后的各层土壤水分均呈中等强度变异。降雨前各层土壤水分变异系数在 11.16%~29.08%之间,降雨后(降雨量 11 mm)的变异系数在 16.05%~27.85%之间,雨

后土壤水分变异程度较降雨前明显增加。

(2)在所选坡面上,土壤水分具有一定的空间结构特征,呈现明显的空间异质性。降雨前各层土壤水分半变异函数均可拟合成指数模型,块基比在 0.16~0.50 之间,空间自相关性存在于 23.7~186.0 m 的范围内;降雨后的表层和亚表层土壤水分半变异函数可拟合为指数和球状模型,块基比在 0.11~0.28 之间,空间自相关性存在于 17.3~42.6 m 范围内。由此可见,降雨使坡面土壤水分的变异程度增加、空间自相关性增强,同时使空间自相关范围缩小、破碎化程度提高,对土壤水分空间分布及生态过程的影响较大。

(3)在本文考虑的环境因素中,叶面积指数、枯落物厚度和坡度均与土壤水分呈负相关关系,样点距最近一棵树的距离与土壤水分呈正相关关系。降雨前后影响土壤水分变化的主导因素不同,其中叶面积指数和枯落物厚度主要影响雨后的土壤水分分布,样点距最近一棵树的距离和样点坡度则对雨前土壤水分的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 科尔沁沙地沙质草场土壤水分对于干旱和降雨响应的空间变异性[J]. 水土保持学报,2005,19(1):140-144.
- [2] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J]. 应用生态学报,2009,20(1):98-104.
- [3] Brocca L, Morbidelli R, Melone F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333: 356-373.
- [4] Feng Q, Zhao W W, Qiu Y, et al. Spatial Heterogeneity of soil moisture and the scale variability of its influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China

[J]. Water, 2013, 5(3): 1226-1242.

- [5] 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 57-63.
- [6] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 87-93.
- [7] 付同刚,陈洪松,张伟,等. 喀斯特小流域土壤含水率空间异质性及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 124-131.
- [8] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain [J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/4): 199-214.
- [9] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2277-2282.
- [10] 张川,陈洪松,张伟,等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585-1591.
- [11] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [12] 李元寿,王根绪,丁永建,等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 61-67.
- [13] 姚丹丹,雷相东,余黎,等. 云冷杉针阔混交林叶面积指数的空间异质性[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 71-79.
- [14] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [15] 李振新,郑华,欧阳志云,等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1015-1021.
- [16] Ivanov V Y, Fatichi S, Jenerette G D, et al. Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the “homogenizing” effect of vegetation[J]. Water Resources Research, 2010, 46(9): W09521, doi:10.1029/2009WR008611.

(上接第 196 页)

- [9] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-324.
- [11] 李桂林,陈杰,孙志英,等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [12] Yemefack M, Jetten V, Rossiter D. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(1): 84-98.

- [13] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90(1): 25-45.
- [14] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 100-105.
- [15] 王秀红. 我国水平地带性土壤中有机质的空间变化特征[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 19-23.
- [16] 俞海,黄季焜, Rozelle S, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 380-388.