

黄土高寒区小流域土壤水分空间变异与环境影响因子

谢正丰, 王冬梅, 张鹏, 张泽洲, 任怀新, 王慧, 黄薇, 张琳琳

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 针对区域流域尺度上土壤水分在地形、植被等要素协同作用下的空间异质性规律以及响应机制研究较少, 以青海大通典型人工林小流域为研究对象, 自坡脚向上延 3 个坡向(阴坡、半阴坡、阳坡)呈放射状选取 3 条样线带布设样点, 采用统计学分析、主成分分析和冗余分析等方法研究生长季初末时期 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 各层土壤水分空间变异特征, 以及各环境因子(海拔、植被高度、植被冠幅、地上生物量、草本丰富度、草本盖度、枯落物干重)对其影响规律。结果表明: 生长季末水分均值、最大值均大于生长季初, 各坡向体积含水率最大值、均值均表现为阴坡>半阴坡>阳坡, 各土层呈中等变异($10\% < CV < 100\%$); 各坡向变异系数在初期表现为半阴坡>阳坡>阴坡, 在末期表现为阳坡>半阴坡>阴坡; 水分采样点间隔在初期应在 36.50~448.90 m, 末期应在 18.30~552.40 m; 冗余分析结果显示, 海拔是影响青海高寒区土壤水分异质性的主控因素, 解释率为 35.3% ($p < 0.01$), 草本丰富度次之, 解释率为 26.1% ($p < 0.01$), 植被高度与植被冠幅也有显著影响。研究结果可为青海黄土高寒区退耕还林小流域生态水文过程研究以及后续植被恢复提供数据与理论参考。

关键词: 黄土高寒区; 土壤水分; 空间变异; 冗余分析(RDA)

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0196-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.025

Spatial Variation of Soil Moisture and Its Environmental Influencing Factors in A Small Watershed in the Loess Alpine Region

XIE Zhengfeng, WANG Dongmei, ZHANG Peng, ZHANG Zezhou,

REN Huaixin, WANG Hui, HUANG Wei, ZHANG Linlin

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: There are few studies on the spatial heterogeneity law and response mechanism of soil water under the synergistic effect of topography, vegetation and other elements at the regional watershed scale. Taking the typical small watershed restored by artificial forest in Datong, Qinghai Province as the research object, three slope aspects (shady slope, semi-shady slope and sunny slope) were selected, and the sample points were laid out in three transect belts, which were in a radial pattern. Statistical analysis, principal component analysis and redundancy analysis methods were used to study the soil moisture spatial variation characteristics in 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm and 80—100 cm layers at the beginning and the end of the growing season, as well as the effects of environmental factors (altitude, vegetation height, vegetation canopy, aboveground biomass, herb richness, herb cover and dry weight of litter). The results showed that the average and maximum water content at the end of the growing season were both greater than those at the beginning of the growing season, and the maximum and average values of volumetric water content in each slope aspect followed the order of shady slope>semi-shady slope>sunny slope, and each soil layer showed a moderate variation ($10\% < CV < 100\%$). The variation coefficient of each slope aspect followed the order of semi-shady slope>sunny slope>shady slope at the initial stage, and at the final stage the order was sunny slope>semi-shady slope>shady slope. The water sampling point interval should be from 36.50 to 448.90 m at the initial stage and 18.30 to 552.40 m at the final stage. The redundancy analysis results showed that

收稿日期: 2022-01-05

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2017YFC0504604-04)

第一作者: 谢正丰(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤水分时空异质性研究。E-mail: 1592786383@qq.com

通信作者: 王冬梅(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态修复研究。E-mail: dmwang@126.com

altitude was the main controlling factor affecting soil moisture heterogeneity in the alpine region of Qinghai, with an explanation rate of 35.3% ($p < 0.01$), followed by the herb richness, with an explanation rate of 26.1% ($p < 0.01$). Vegetation height and vegetation crown width also had significant effects. The research's results could provide data and theoretical reference for the study of the eco-hydrological process and the subsequent vegetation restoration in small watershed of returning farmland to forest in the loess alpine region of Qinghai.

Keywords: Loess alpine region; soil moisture; spatial variation; redundancy analysis (RDA)

土壤水分是与降水、径流和地下水有关的水文过程中的一个关键参数^[1],在典型高寒区,土壤水分是维系植物生长的重要因素,也是森林生态系统物质循环的载体^[2],在 SPAC(土壤—植被—大气)连续体的水文过程以及能量交换中处于核心位置,影响着作物产量^[1]以及生态恢复。

土壤水分因所处地点不同、土层深度差异,植被恢复程度不一,空间分布表现出明显的异质性。近年来,结合地理信息系统与地统计学方法研究土壤性质空间变异以及空间分布已成为一种重要研究方法^[3-4],并在干旱黄土区得到广泛应用^[5-6]。当前,国内对于土壤水分空间异质性的研究多集中在黄土区^[7-8]、红壤区^[9]以及喀斯特地区^[10-11],研究内容涉及试验农田^[8]、人工林^[7]与天然灌草地^[10]。此外,国内外学者从不同采样尺度^[12]、采样间距^[13]以及土地利用方式^[14]等方面对土壤含水量空间变异性进行了研究,结果表明,土壤水分空间异质性程度随采样尺度增大而增大,计算精度受采样间距的显著影响,农地变异系数高于林地,农林混合利用加强了土壤水分的空间变异程度。

土壤水分的空间异质性受多重因素的影响,气候条件、土壤质地、地形地貌以及植被覆盖类型等各要素之间相互协同、叠加影响,导致土壤水分空间分布更加复杂^[15]。Güntner 等^[15]研究认为,土壤水分的空间分布格局可以由地形、土壤、植被和土地利用等景观的空间变异解释;胡伟等^[16]研究发现,坡位和坡向可同时影响土壤含水量和土壤水分空间变异程度;Cantón 等^[17]研究表明,地表植被是影响土壤水分空间分布的最重要因素,在一定程度甚至可以掩盖地形因子的影响。在不同研究区域或不同尺度上,由于坡面地形条件、植被覆盖等均有所差异,影响土壤水分空间分布的主控因素不尽相同^[18],很多研究结论并不满足于所有研究区域,甚至相悖。

青海黄土高寒区地处黄土高原与青藏高原过渡地带,属于干旱半干旱气候区,降水量少且分布不均。区域内气候、植被、土壤以及人类活动强度不同,土壤水分分布存在显著时空差异。自 1999 年中国政府实施“退耕还林”政策恢复当地植被,由于缺乏生长季初

末状态区域土壤水分空间异质性研究,大面积人工林出现密度过大、林分结构不合理等问题,引起土壤干燥化效应。进行青海黄土高寒区土壤水分及其空间变异研究,对该区生长季水资源合理利用、植被恢复以及生态建设具有重要意义。因此,本文以黄土高寒区典型人工林小流域为单元,结合该地区植被生长特性,对比分析生长季初期与末期土壤水分的空间分布格局差异,并利用植被数量生态学中的主成分分析和冗余分析揭示各环境影响因子的影响程度,为黄土高寒区森林水文以及生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于青海省西宁市大通回族土族自治县南部(36°53'N,101°46'E),是黄土高原与青藏高原过渡地带的典型高寒丘陵区小流域(3.87 km²)。该区海拔 2 360~2 760 m,属高原大陆性气候,气温较高,昼夜温差大,无霜期长(约 102 天),年平均气温 5.2 °C,年降水量约 465 mm,主要集中在植物生长季(5—9 月),占全年总降水量的 87%,研究区生长季内气温与降水量见图 1。2018 年、2019 年研究区气温、降水特征表现出高度相似性,为分析该地区土壤水分的空间异质性提供时间稳定性的基础。土壤类型为黄土母质上发育的山地棕壤和栗钙土,流域内植被以寒温性常绿针叶林及落叶阔叶林为主,主要种植青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、早熟禾(*Poa annua* L.)、苜蓿(*Medicago sativa* L.)等。

1.2 试验方法

1.2.1 样点布设与样品采集 本研究选取杨家寨小流域,自坡脚向上延 3 个方向(阴坡、半阴坡、阳坡)呈放射状选取 3 条样线带,分别记为 L1、L2、L3。在多样线带上每隔 10 m 布设 1 个土壤水分观测点(L1, 22 个;L2, 20 个;L3, 10 个),共 52 个测点。将 PVC 管在测定前 1 个月埋入用与 CNC503B 型中子仪配套的钻机钻好的钻孔内,并将土体与 PVC 管之间的

间隙用干细土填充紧密,于 2018 年、2019 年 5 月 15 日至 9 月 30 日月初与月中进行土壤水分取样,测定时,利用中子仪每隔 20 cm 测定 1 次土壤含水率,每层重复 3 次,取其平均值作为该层土壤的中子数,并采用烘干法标定,获得公式(1)。

$$m = 0.7075n + 0.0233 \quad (1)$$

式中: m 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); n 为中子数。

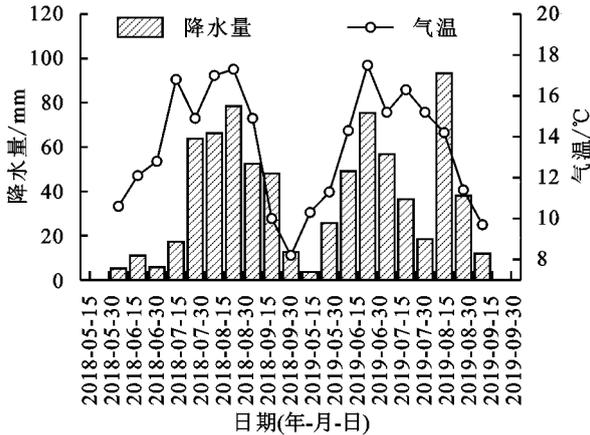


图 1 生长季降水与气温特征

利用 GPS(global positioning system)记录每个采样点的经纬度、海拔、坡度和坡向。在每个土壤水分采样点的周围选择 3 棵标准木,记录乔木的高度与冠幅。在采样点周围按“米”字形选取 5 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 草本样方,记录样方内草本的种类、名称和盖度,并利用公式(2)^[18]计算草本丰富度。在不破坏样方内原有枯落物结构的前提下,分层收集样方内全部枯落物,将采集的枯落物尽量保持原状,在烘箱内($74\text{ }^\circ\text{C}$)烘干再称重。灌草层的地上部分生物量采用刈割法获得,带回实验室(各 100 g 左右)在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干至恒重,取对应各样方平均值作为该样点植被高度、植被冠幅、草本盖度、草本丰富度、枯落物干重和地上生物量。

$$R = (n - 1) / \ln N \quad (2)$$

式中: n 为物种总数; N 为所有物种的个体数之和。

1.2.2 空间格局分析 地统计学是以具有空间分布特点区域化变量理论为基础,能在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计^[19]。利用地统计学中特有的半方差函数对区域化变量进行半方差分析,所得结果反映区域变量的空间相关性,根据半方差函数计算公式(3):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

$z(x_i)$ 在点 x 和 $x + h$ 处的值 $z(x_i)$ 与 $z(x_i + h)$ 差的方差的 $1/2$ 叫作区域化变量 $z(x)$ 的半变异函数。式中: $\gamma(h)$ 为 h 的半方差函数值; h 为两样本点之间的空间分隔距离; $N(h)$ 为当间隔距离等于 h

时的样本对数; $z(x_i)$ 与 $z(x_i + h)$ 分别表示在 x_i 与 $x_i + h$ 处区域化变量 $z(x)$ 的实测值。

1.2.3 梯度分析 主成分分析(principal component analysis, PCA)是一种常见的用来数据降维的非约束性分析,冗余分析(redundancy analysis, RDA)是被广泛应用于反映响应变量与环境因子之间关系的约束性分析^[20]。对响应变量进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),根据排序轴的梯度长度最大值选择线性模型或单峰模型(最大值 < 3 , 选择线性模型; $3 < \text{最大值} < 4$, 选择线性模型或单峰模型;最大值 > 4 , 选择单峰模型),经 DCA 分析后,选择 RDA 来进行排序,并运用蒙特卡罗检验分析评价环境因子对土壤水分空间变异影响的显著程度。

1.3 数据处理与分析方法

利用 SPSS 24.0 软件对各层土壤水分数据进行 K—S(Kolmogorov—Smirnov)正态分布检验和描述性统计分析,半方差函数的计算与模型的拟合采用 GS+9.0。此外,利用 Origin 2021 与 Canoco 5 软件分析土壤水分空间变异与环境影响因子的关系,相关图表制作在 Excel 2019 和 Origin 2021 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤水分描述性统计特征

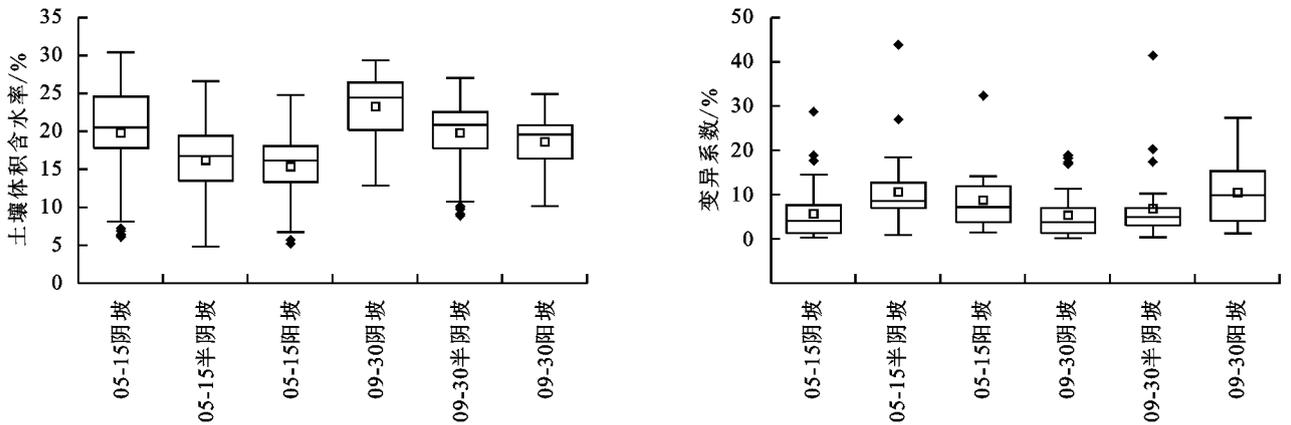
由表 1 可知,生长季初、末时期剖面土壤体积含水率最小值出现在半阴坡 $0\text{--}20\text{ cm}$ 土层,分别为 4.80% 、 8.86% ,最大值出现在阴坡,初期最大土壤体积含水率为 30.42% ,末期最大土壤体积含水率为 29.39% 。在生长季初期,土壤体积含水率均值在各坡向上随土层深度的增加而增大,末期自上而下随土层的变化规律不明显,生长季末期各层土壤体积含水率均值均高于生长季初期对应土层,各坡向体积含水率的最值和均值均表现为阴坡 $>$ 半阴坡 $>$ 阳坡,其中半阴坡土壤体积含水率变化范围最大(图 2)。从变异系数(coefficient of variation, CV)来看,生长季初期阴坡 $20\text{--}80\text{ cm}$ 土壤体积含水率属于弱变异($0 < \text{CV} < 10\%$),其余各坡向各土层均属于中等变异($10\% < \text{CV} < 100\%$),表层土壤变异系数最大,生长季初期各坡向变异系数均表现为半阴坡 $>$ 阳坡 $>$ 阴坡,末期表现为阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 阴坡(图 2)。此外,生长季初、末时期各层土壤水分标准差在 $0.01\text{--}0.05$ 波动,偏度为 $-2.36\text{--}1.15$,峰度为 $-1.73\text{--}7.52$ 。

半方差函数研究变量的空间相关性主要通过区域化变量分割等距离样点间的差异来实现,从表 1 可以看出,生长季初末时期各层土壤水分经 K—S 检验的 p 值均大于 0.05 ,满足正态分布^[21],不必进行数据转化,可以直接进行空间相关分析。

表 1 生长季前后各坡向不同土层深度土壤水分的描述性统计

调查时间/ (月—日)	坡向	土层 深度/cm	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	变异 系数	K—S 值	偏度	峰度
05—15	阴坡	0—20	6.08	15.03	9.53±0.01e	0.03	28.25	0.13	0.41	-0.81
		20—40	14.92	21.59	18.81b	0.02	8.68	0.19	-0.57	0.40
		40—60	19.32	25.90	23.22a	0.02	9.22	0.25	-0.88	-0.72
		60—80	19.83	27.66	23.45a	0.02	8.81	0.19	-0.37	-0.47
		80—100	19.01	30.42	24.03±0.01a	0.03	13.62	0.16	-0.11	-0.94
	半阴坡	0—20	4.80	17.45	9.51±0.01e	0.05	47.63	0.23	0.81	-0.94
		20—40	8.94	21.38	15.50±0.01cd	0.03	20.96	0.11	-0.01	-0.55
		40—60	10.01	26.61	18.19±0.01b	0.04	23.17	0.13	0.12	-0.59
		60—80	11.63	25.75	19.05±0.01b	0.03	17.41	0.13	-0.08	0.09
		80—100	12.08	24.32	18.73±0.01b	0.03	17.88	0.10	0.05	-0.66
阳坡	0—20	5.17	11.92	7.92±0.01e	0.02	28.71	0.24	0.73	-0.11	
	20—40	12.78	17.17	14.65d	0.01	10.20	0.17	0.15	-1.13	
	40—60	13.55	21.85	17.11±0.01bc	0.03	14.77	0.12	0.39	-0.16	
	60—80	14.63	23.31	18.07±0.01b	0.02	13.36	0.16	0.98	1.59	
	80—100	14.25	24.77	19.01±0.01b	0.03	17.20	0.16	0.39	-0.54	
阴坡	0—20	12.87	27.38	18.07±0.01b	0.03	16.46	0.18	1.15	3.62	
	20—40	16.76	28.92	24.64±0.01a	0.03	10.67	0.27	-1.62	3.32	
	40—60	17.35	29.39	25.42±0.01a	0.03	12.23	0.28	-1.44	1.55	
	60—80	17.59	29.15	24.28±0.01a	0.03	12.15	0.17	-0.63	0.05	
	80—100	18.32	28.32	23.92±0.01ab	0.02	10.31	0.20	-0.13	0.31	
09—30	半阴坡	0—20	8.86	19.01	13.66±0.01f	0.03	25.32	0.18	-0.03	-1.72
		20—40	17.35	25.38	22.05bc	0.02	19.29	0.15	-0.45	0.14
		40—60	16.76	27.03	21.06±0.01cd	0.03	18.49	0.11	0.46	0.12
		60—80	14.29	24.43	21.76c	0.02	17.87	0.22	-2.36	7.52
	阳坡	80—100	12.40	23.33	20.52±0.01cd	0.03	16.75	0.30	-1.86	3.68
		0—20	10.15	21.72	15.02±0.01f	0.03	21.50	0.17	0.78	1.07
		20—40	14.76	22.55	20.40±0.01cd	0.02	11.35	0.20	-1.75	3.77
		40—60	11.45	23.25	19.29±0.01de	0.03	17.58	0.26	-1.52	2.60
阴坡	60—80	11.93	24.91	19.34±0.01de	0.03	16.53	0.26	-1.00	4.01	
	80—100	12.87	24.79	19.00±0.01ab	0.03	16.16	0.21	-0.20	2.05	

注:平均值数据后不同字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)。



注:箱图中横线位置从下至上分别表示为最小值、下四分位数、中位数、上四分位数、最大值;□表示均值;*表示特异值。

图 2 平均土壤体积含水率及变异系数变化趋势

2.2 土壤水分空间变异结构分析

由表 2 可知,各坡向土壤体积含水率拟合的最佳理论模型主要为高斯模型,具体特征表现为土壤水

分的空间相关性随着距离的增加而减弱,最后在样点间隔距离为变程时达到稳定。在生长季初期与末期,阴坡土壤体积含水率的变程均呈现随土层加

深而逐渐增大的趋势,当样点间的距离超过最大变程($A_{\text{初期}}=448.90\text{ m}$, $A_{\text{末期}}=522.40\text{ m}$)时,变量的空间自相关性消失,因此采样点间的最大间距应小于对应变程,阳坡土壤体积含水量的变程在生长季初、末期随土层加深而增大,在 20—40 cm 处达到最大值,随后波动变化。

各土层水分模拟残差 RSS 值均比较低($6.79 \times 10^{-9} \sim 1.76 \times 10^{-5}$),生长季前期阴坡 20—40 cm 与 40—60 cm 土层的半方差函数模型解释率较低,分别

为 0.14,0.05,说明采样点之间表现出较强的随机性。 C_0 为块金值, $C_0 + C$ 为基台值, $C_0 / (C_0 + C) \%$ 为块基比,用来划分变量的空间自相关程度,一般认为块基比 $< 25\%$ 时空间相关性较强,在 $25\% \sim 75\%$ 时空间相关性中等, $\geq 75\%$ 时空间相关性较弱^[22]。本研究中生长季初期阴坡 20—40 cm 与 40—60 cm 土层与生长季末期阳坡 60—80 cm 土层土壤体积含水量由随机因素主导,其余各土层均具有强烈的空间自相关性,空间变异由结构性因素主导。

表 2 土壤体积含水量变异函数模型及相关参数

调查时间/ (月—日)	坡向	土层 深度/cm	模型	块金值	基台值	变程/m	决定 系数	残差	块金/ 基台
	阴坡	0—20	Gaussian	0	0.00068	36.50	0.43	8.132×10^{-7}	0
		20—40	* Linear	0.00196	0.00196	73.07	0.14	1.23×10^{-5}	1.0000
		40—60	* Linear	0.00058	0.00058	73.07	0.05	6.65×10^{-7}	1.0000
		60—80	* Exponential	0.00026	0.00215	210.90	0.26	3.79×10^{-7}	0.1209
		80—100	Spherical	0.00004	0.00195	448.90	0.87	2.43×10^{-7}	0.0205
	05—15 半阴坡	0—20	Gaussian	0	0.00304	68.40	0.90	7.74×10^{-6}	0
		20—40	Gaussian	0.00020	0.00177	137.10	0.91	2.90×10^{-7}	0.1130
		40—60	Gaussian	0.00023	0.00420	174.60	0.94	8.46×10^{-7}	0.0548
		60—80	Gaussian	0.00041	0.00188	147.10	0.84	4.50×10^{-7}	0.2181
		80—100	Gaussian	0.00009	0.00099	141.80	0.76	3.12×10^{-7}	0.0909
	阳坡	0—20	Gaussian	0	0.00043	129.00	0.93	9.92×10^{-9}	0
		20—40	Gaussian	0.00013	0.00127	210.90	0.64	6.79×10^{-9}	0.1024
		40—60	Gaussian	0.00017	0.00235	121.40	0.94	2.12×10^{-8}	0.0723
		60—80	Spherical	0.00015	0.00055	145.60	0.40	5.30×10^{-8}	0.2727
		80—100	Linear	0	0.00281	155.00	0.98	2.52×10^{-8}	0
	阴坡	0—20	Exponential	0	0.00065	18.30	0.16	3.99×10^{-7}	0
		20—40	* Gaussian	0	0.00190	49.60	0.96	7.33×10^{-8}	0
		40—60	* Gaussian	0	0.00272	72.40	0.99	1.60×10^{-8}	0
		60—80	Linear	0	0.00247	411.40	0.95	9.07×10^{-8}	0
		80—100	* Gaussian	0	0.00102	522.40	0.70	2.24×10^{-7}	0
09—30 半阴坡	0—20	Gaussian	0.00001	0.00335	187.50	0.98	1.54×10^{-7}	0.0030	
	20—40	Spherical	0	0.00037	166.40	0.57	7.99×10^{-8}	0	
	40—60	Spherical	0	0.00063	178.10	0.68	1.64×10^{-7}	0	
	60—80	Spherical	0.00014	0.00218	158.70	0.98	2.94×10^{-8}	0.0642	
	80—100	Gaussian	0	0.00301	113.80	0.52	7.90×10^{-6}	0	
	阳坡	0—20	Gaussian	0.00010	0.00465	150.70	0.98	1.45×10^{-8}	0.0215
		20—40	Exponential	0.00018	0.00106	210.90	0.46	3.42×10^{-8}	0.1698
		40—60	Spherical	0.00036	0.00114	140.90	0.35	2.11×10^{-7}	0.3158
		60—80	Linear	0.00661	0.00661	174.96	0.45	1.76×10^{-5}	1.0000
		80—100	Exponential	0.00086	0.00244	210.90	0.36	5.12×10^{-7}	0.3525

注: * 表示数据经 log 转换,因数据经 log 转换后,空间的规律性更明显,残差更小,符合正态分布。

2.3 土壤水分变异的环境影响因子分析

2.3.1 生长季 0—100 cm 土壤水分潜在环境影响因子统计分析 通过 PCA 获得 2 个包含 82.50% 原始信息的主成分。其中,主成分 1(principal component

1, PC1) 的解释率为 63.36%,主成分 2(principal component 2, PC2) 的解释率为 19.14%(图 3),说明提取的主成分与原始变量相关性较大,具有一定的代表性。

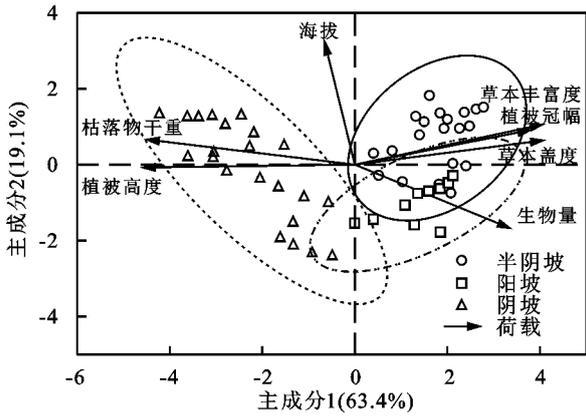


图 3 环境影响因子主成分载荷

PCA 计算结果(表 3)表明,PC1 包括植被高度、枯落物干重、草本盖度和草本丰富度的最大信息,其中植被高度和枯落物干重呈负向分布,草本盖度以及草本丰富度呈正向分布。PC2 综合了海拔、草本盖度和生物量的最大信息,海拔和草本盖度在第 2 主成分上呈正向分布,生物量呈负向分布。按照贡献率大小,影响青海黄土高寒区土壤水分空间异质性的环境因子,分别为植被因素和海拔因子。

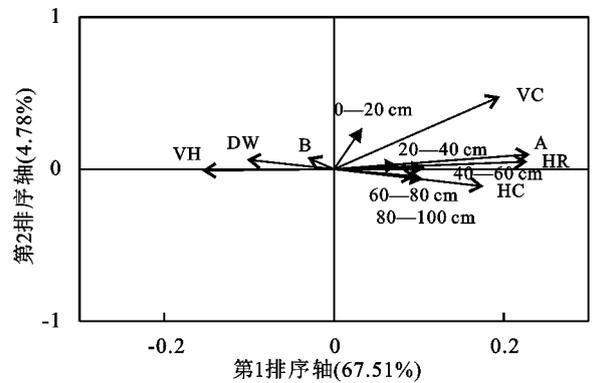
表 3 环境影响因子主成分分析

变量	主成分	
	1	2
海拔	-0.06526	0.80750
植被高度	-0.45785	-0.01941
植被冠幅	0.37874	0.22673
草本盖度	0.40617	0.45938
草本丰富度	0.40505	0.26367
枯落物干重	-0.44912	0.16481
生物量	0.33455	-0.41722
特征根	4.43	1.34
解释率/%	63.36	19.14
累计解释率/%	63.36	82.50

2.3.2 生长季各层土壤水分变异的关键潜在环境影响因子 为进一步了解潜在环境因子对土壤水分的影响,并识别出土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子,本研究将土层深度作为协变量,观测环境因子对整个生长季(5—9 月)各层土壤水分的影响。对各层土壤体积含水率做 DCA 分析后,根据典范轴长度选择 RDA 分析(图 4)。图 4 中各土层箭头的夹角余弦值表示土层之间的相关性,影响因子箭头连线长度代表环境因子与各层土壤水分异质性相关性大小,箭头长度与相关性大小呈正相关;箭头所处的象限代表各影响因子与排序轴正负相关性;影响因子箭头在排序轴上的投影代表其与排序轴的相关性;土层箭头与各影响因子箭头的夹角余弦值代表两者的相关性。

由不同土层深度土壤体积含水率与潜在环境因

子关系在 RDA 排序图(图 4)可以看出,前 2 个排序轴可以解释土壤水分变异的 72.29%。海拔的连线长度最长,草本丰富度其次,生物量最短。此外,从土层箭头与影响因子的夹角来看,各层土壤含水率与海拔高度、草本丰富度、植被冠幅、草本盖度夹角均呈锐角,呈正相关,0—20 cm 土层与这些影响因子夹角均大于其余土层,说明表层土壤含水率受这些环境的影响程度小于其他土层;与植被高度、枯落物干重、土壤容重以及生物量呈钝角,表现出负相关。海拔与 40—60 cm 土层夹角接近零,在 0—60 cm 范围随土层加深,海拔与土层夹角变小,说明在该范围内海拔对土壤水分影响程度随土层加深而增大,在 60—100 cm 范围海拔对土壤水分影响程度随土层加深而减小。



注:实心箭头表示不同土层土壤体积含水率;空心箭头表示影响因子;A 为海拔高度(m);VC 为植被冠幅(cm);B 为生物量;DW 代表枯落物干重(g/m²);VH 为植被高度(m);HC 为草本盖度;HR 为草本丰富度。

图 4 土壤体积含水率及潜在环境影响因子冗余分析(RDA)排序

各环境因子中,海拔、草本丰富度、植被冠幅和植被高度对不同土层深度土壤水分的影响均达到显著水平($p < 0.05$)(表 4),海拔对不同深度土层土壤水分变异的解释率最高,为 35.3%,草本丰富度的解释率 26.1%,植被冠幅以及植被高度综合解释率接近 10%。

表 4 环境显著影响因子分析

环境因子	解释率/%	贡献度/%	F 检验	p 值
海拔	35.3	48.5	27.3	0.002
草本丰富度	26.1	35.8	33.1	0.015
植被冠幅	4.8	6.5	6.7	0.034
植被高度	4.8	6.6	8.0	0.047

3 讨论

3.1 土壤水分的变异系数与空间异质性

变异系数常用来对土壤水分的变异进行定性分析,其结果依赖于所研究的尺度^[12]。本研究中变异系数为 13.14%~32.57%变化,此值范围稍低于王甜等^[23]的研究结果(32.62%~38.98%),这可能是由于二者研究所处地区不同,导致植被、土壤以及地形等

因素有所差异。本研究较太岳山小流域面积小,采样幅度尺度也较小,随着研究区域的不断增大,某些在较大尺度上影响土壤水分分布的因素在较小、有限的尺度内可能具有相对一致性,当尺度增大时,对水分分布所起的影响效应才得到体现,从而使得变异系数增大,变异增强,这也与胡伟等^[16]的研究结果一致,本研究结果显示,土壤含水量越大的土层空间异质性越小,与以往黄土高原地区的研究^[24]结果一致,这是因为土壤水分含量越高,土壤的饱和程度越高,负压越小,土壤含水量的变异性越小。但王云强等^[25]研究发现,黄土高原 0—500 cm 土壤水分含量与变异系数变化呈一致性,这可能是由于受黄土高原气候、地形以及土壤质地等因素的影响,控制土壤水分的主要过程(降水、蒸散发、再分布以及植物根系分布)不同,再加上黄土高原古土壤层的存在,导致该区域土壤水分分布与变化与其他地方存在差异。在分析垂直方向上土壤含水量的空间变异性时,需要同时考虑土壤含水量大小以及含水量变化幅度大小。本研究结果显示,变异系数随土层加深逐层减小,但在 40—60 cm 层突变增大,这可能是由于受研究区地质环境的影响,特别是土层中普遍存在的钙积层以及不同植被根系分布差异使得土壤水分变异系数增大。

本研究土壤水分表现为强烈的空间自相关性,表明受随机因素影响较小,主要受植被、地形地貌等自然因素的空间自相关而引起土壤水分的空间变异。本研究中块基比多分布在 2.05%~21.81%,与多数人工林研究结果^[26-27]相近,较灌草地^[10]研究结果小,这可能是由于人工林恢复年限越长,树木的年龄、空间分布以及垂直结构均一化程度越大,植被斑块均质化程度越高,土壤分布较灌草地更稳定。此外,块基比与变程的关系在各研究也有差异,武泽宇等^[26]研究得出,土壤水分块基比与变程变化趋势一致;张川等^[10]研究结果相反,而本研究块基比与变程变化趋势不表现明显规律,这可能是各研究样地土层厚度、地质背景、气候差异所致。本研究变程在阴坡随土层自上而下增大,阳坡规律不明显,这可能是由于土壤含水量也影响变程大小,在土壤水分较高或者持续降雨后,土壤水分变程增大,该结论与以往研究^[28]结果相一致,但在地形特殊且复杂的喀斯特地区,侧向流的再分配以及石丛的存在会强化土壤水分的不连续性,从而使变程减小。

3.2 土壤水分分布及环境因子分析

土壤水分分布受多种因素叠加共同影响,冗余分析识别出海拔与草本丰富度是青海高寒区土壤水分

的主控因素,原因在于影响土壤水分分布的土壤理化性质、植被以及气候等因素都在一定程度上受到海拔的影响,从而进一步影响土壤水分分布。

RDA 排序图表明,各层土壤水分与海拔均呈显著正相关,这与郭欣欣等^[14]的研究结果一致,并且海拔越高,土壤水分越易保持,导致土壤水分含量与海拔呈正相关,这与张璐等^[29]和刘洋等^[11]的研究结果一致。也有研究^[30]得出,海拔与土壤水分呈负相关,此外,高晓东等^[31]研究发现,高程对土壤水分空间分布影响较弱,Charpentier 等^[32]研究发现,海拔与土壤水分没有相关性,这可能是由于影响土壤水分的因子较为复杂,各影响因子之间通过交互作用促进或削弱对土壤水分的影响,区域海拔越低,汇流面积越大,土壤水分含量越大;在全流域尺度上,考虑到全流域尺度海拔越高,降水量越多,蒸发量越少,气象因子可能掩盖海拔对土壤含水量的影响。在不同时间段,土壤水分分布与变异所受的主导因素不同,土壤水分的分布与变异具有时间依赖性,这也导致某些研究结果存在差异性,因此土壤含水量与海拔在不同区域与尺度下没有一致性规律。

草本丰富度、植被冠幅和植被高度也显著影响各层土壤水分含量。地表植被通过截流、树干径流以及冠层蒸发等拦截部分降水,缓冲降水对地表土壤的直接作用,减弱土壤侵蚀程度,有利于土壤蓄水保水。较大的植被冠幅与草本盖度在降水后可以有效减弱地表受太阳辐射造成的蒸发,多种植被因素共同调控土壤水分的分布。适宜的植被冠幅与草本盖度可以使降水的缓冲作用达到最佳水平,当土壤水分趋于稳定时,土壤呼吸等碳循环的关键过程能得到有效减弱。生物量、枯落物干重与土壤水分分布呈负相关,但相关性不显著,原因可能是土壤水分分布受多种因素影响,多因素综合作用下,生物量和枯落物干重对土壤水分的影响可能被其他因素覆盖,使其相关性不显著。

4 结论

(1)青海黄土高寒区人工林生长季初期,土壤积含水率在各坡向上随土层深度增加而增大,生长季末期土壤体积含水率高于初期,各坡向体积含水率最大值、均值均表现为阴坡>半阴坡>阳坡,各土层主要呈中等变异($10\% < CV < 100\%$),表层土壤变异系数最大,各坡向变异系数在初期表现为半阴坡>阳坡>阴坡,在末期表现为阳坡>半阴坡>阴坡。

(2)研究区阴坡土壤体积含水率的变程随土层加深逐渐增大,初期变程范围为 36.50~448.90 m,末期变程范围为 18.30~522.40 m,合理土壤水分采样间

隔应该在变程范围内,可以为青海黄土高寒区土壤水分采样提供科学参考。

(3)土壤水分受多种环境因子的综合影响,其中海拔高度对土壤水分空间变异影响程度最大(解释率为35.3%),草本丰富度次之(解释率为26.1%),植被冠幅与植被高度对土壤水分空间分布也均有显著影响($p < 0.01$),可以为后续合理植物配置提供理论依据。

参考文献:

- [1] Li X Z, Shao M A, Jia X X, et al. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340-m long transect on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 77-86.
- [2] Bernacchi C J, VanLoocke A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: A dominant role for water[J]. *Annual Reviews of Plant Biology*, 2015, 66(1): 599-622.
- [3] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3/4): 203-224.
- [4] Li J R, Okin G S, Alvarez L, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(1): 73-88.
- [5] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 513-520.
- [6] 刘晓丽, 马理辉, 杨荣慧, 等. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 139-145.
- [7] 林莎, 贺康宁, 王莉, 等. 基于地统计学的黄土高寒区典型林地土壤水分盈亏状况研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 728-737.
- [8] 张诗祁, 牛文全, 李国春. 关中平原田间土壤含水量的空间变异性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 821-828.
- [9] 戴军杰, 章新平, 吕殿青, 等. 南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 123-131.
- [10] 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[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6326-6334.
- [11] 刘洋, 罗娅, 陆晓辉, 等. 喀斯特峡谷区土壤水分特征及其影响因素研究[J]. *生态科学*, 2021, 40(3): 8-16.
- [12] 史文娟, 马媛, 徐飞, 等. 不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 585-593.
- [13] 邢旭光, 赵文刚, 柳焯, 等. 猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水率空间变异性研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 138-145.
- [14] 郭欣欣, 付强, 卢贺, 等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(19): 123-130.
- [15] Güntner A, Bronstert A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 297(1/4): 136-161.
- [16] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕地土壤水分空间变异性研究[J]. *水科学进展*, 2006(1): 74-81.
- [17] 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.
- [18] 纪文瑶. 内蒙古草原生物量、地下生产力及其与环境因子关系研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2013.
- [19] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 田间土壤水量平衡与定位通量法的应用[J]. *水利学报*, 1988(5): 1-7.
- [20] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [21] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 35-64.
- [22] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 743-754.
- [23] 王甜, 康峰峰, 韩海荣, 等. 山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3902-3911.
- [24] Hu W, Shao M A, Han F P, et al. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land[J]. *Geoderma*, 2011, 162(3/4): 260-272.
- [25] 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.
- [26] 武泽宇, 薛亮, 张显松, 等. 喀斯特白云岩坡地旱季不同植被类型土壤水分空间变异性[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 74-83.
- [27] 刘宇, 王彦辉, 郭建斌, 等. 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[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 197-204.
- [28] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarararra catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(1): 20-37.
- [29] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 124-132.
- [30] 付国珍, 摆万奇, 姚丽娜. 拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2115-2122.
- [31] 高晓东, 吴普特, 张宝庆, 等. 黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 57-67.
- [32] Charpentier M A, Groffman P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D17): 18987-18995.