

晋西黄土区土壤水分时空异质性分析

刘 鑫¹, 毕华兴^{1,2}, 李笑吟¹, 李 俊¹, 郭孟霞¹, 林靛靛¹, 郭超颖¹

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 选择山西吉县蔡家川流域典型坡面, 应用同一尺度(20 m × 20 m)取样方法机械布设土壤水分监测点(313 个), 用 TDR 水分测定仪测定土壤水分(测定时间: 2005 年, 分两个季节: 4 月和 8 月; 土壤剖面分两个层次: 0~ 30 cm 和 30~ 60 cm), 基于 kriging 插值的方法生成了研究区土壤水分空间分布图, 并结合观测季土壤水分的时空分布状况, 研究土壤水分在空间和时间上分布的随机性和结构性特征。研究结果表明: 4 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量低于 30~ 60 cm 土层, 土壤水分变异系数高于 30~ 60 cm 土层, 而 8 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量明显高于 30~ 60 cm 土层, 土壤水分变异系数高于 30~ 60 cm 土层; 4 月、8 月表层土壤水分含量基本相当, 而底层土壤水分含量 8 月明显低于 4 月; 8 月土壤水分的空间异质性程度小于 4 月; 4 月份 0~ 30 cm、30~ 60 cm 土壤水分含量多集中于 10~ 15% 之间, 而 8 月份 0~ 30 cm 土多集中于 10~ 15% 之间, 而 30~ 60 cm 土壤水分均低于 10%, 生长初期土壤水分能支持植物生长的需要, 而生长旺季植被的耗水明显增强, 从土壤中吸收的水分明显增加。

关键词: 土壤水分; 变异函数; 克立格插值; 交叉检验; 黄土区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)06-0051-04

Study on Temporal and Spatial Heterogeneity of Soil Moisture Using Geological Statistics Method on Loess Plateau

LIU Xin¹, BI Hua-xing^{1,2}, LI Xiao-yin^{1,2}, LI Jun¹,
GUO Meng-xia¹, LIN Liang-liang¹, GUO Chao-ying¹

(1. Beijing Forestry University; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation
and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking typical slope in the Caijiachuan watershed as an example on Loess Plateau of China, the analysis of the spatial distribution of soil moisture was focused on using Kriging interpolating method and then the temporal and spatial heterogeneity of soil moisture was studied. In research area, 313 soil moisture sites were arranged on slope at same scale(20 m × 20 m) and then soil moisture was detected by TDR(two seasons: dry and rain; two layers: 0~ 30 cm and 30~ 60 cm) . The results show that: the 0~ 30 cm soil moisture is lower than 30~ 60 cm and it has a high variation coefficient in April. In August, the 0~ 30 cm soil moisture is higher than the 30~ 60 cm soil depth and also has a greater variation coefficient; the surface layer and bottom layer has a same soil moisture but in August the spatial heterogeneity has no obviously change than April; The average soil moisture in different depth of soil profile is about 10%~ 15% in April. While the surface layer soil moisture is 10%~ 15% but bottom layer lower than 10%. It is shown that the soil moisture is enough to provide the plant growth in initial stage, but it cost more water when the plant growth best.

Key words: soil moisture; vary function; Kriging Interpolating; cross-validation; Loess Plateau

黄土区土壤水分是黄土高原生态环境建设的决定性因子, 土壤水分的亏缺及其时空分布的特点决定了土壤水分的承载力十分有限, 为黄土区防护林体系的建设增加了难度^[1]。为此, 本文通过对黄土丘陵沟壑区土壤水分异质性的研究为黄土高原防护林建设提供理论支撑。空间异质性是指系统或系统属性在空间上的复杂性和变异程度, 包括系统属性的空间组成, 空间构型和空间相关。它在生物学系统各个层次上都存在, 是许多基本生态学过程和物理过程在时间

和空间连续系统上长期作用的结果^[2]。地统计学既可用于估测土壤性质的分布, 也可用于确定土壤变异的空间尺度和形式, 还可用于研究引起土壤变异的各种过程, 因此, 是分析土壤空间变异的强有力手段^[3]。但目前的研究结论存在分歧。如, Loague^[4]、Charpentier & Groffman^[5] 等人发现土壤水分不存在或存在微弱空间自相关; 而其他学者利用实测数据研究发现土壤水分存在明显的空间自相关, 相关距离在 1.57~ 2.97 m^[6]、2 m~ 13 m^[7-10]、18 m~ 51 m^[11]、60~ 160

* 收稿日期: 2005-12-15

基金项目: 973 项目“森林植被调控区域农业水土资源与环境的尺度辨析与转换(2002CB111503)”; 教育部重大项目“北方退耕还林区水土保持型植被恢复与重建技术研究(10407)”共同资助

作者简介: 刘 鑫(1982-), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 主要从事林业生态方面的研究; 通讯作者: 毕华兴(1969-), 男, 北京林业大学水土保持学院副教授, 主要从事森林水文和地理信息系统的研究。

m^[12]、550~ 650 m^[13]、和 3 000 m^[14] 之间。显然随着研究尺度的不同,土壤水分空间异质性程度差距很大,本文旨在通过对黄土高原不同季节下的土壤水分测量,分析相同取样尺度的土壤水分空间变异。

1 试验地基本情况

本次试验地位于山西省吉县蔡家川流域(东经 110° 37′ 北纬 36° 40′),流域主沟长 12.15 km,面积 40.10 km²。该流域为黄土高原残塬沟壑区和梁状丘陵沟壑区的典型地区,海拔 904~ 1 592 m,年平均降雨量为 579.5 mm,年平均水面蒸发量为 1 723.9 mm,年均气温 10℃;土壤为褐土,黄土母质;流域森林覆盖率为 39.8%。

实验梁峁,位于蔡家川小流域中部,主梁为南北走向,南北向长 675 m,东西向长 490 m,峁顶海拔 1 195 m,沟底海拔 1 060 m,高差 135 m。坡度范围在 7~ 66° 之间。梁峁坡面植被以人工林为主,包括果园、纯林、混交林、灌草坡;主要乔灌木有梨、刺槐、侧柏、杜梨、山杏、黄刺玫、丁香、狼牙刺、绣线菊、沙棘等。

2 研究方法

2.1 样点布置及测定

选择典型人工林梁峁坡面,采用均匀网格法布置样点,按 20 m× 20 m 的密度设置网格,共布置样点 313 个。在旱季(4 月 20~ 28 日测定)和雨季(8 月 9 日~ 13 日)使用标定后的 TRIME- P3 探头^[15]测定 0~ 30 cm 和 30~ 60 cm 剖面土壤水分含量。

2.2 数据处理

利用 GIS(ArcGIS), 首先将全梁峁样点点位图数字化,生成用于地统计学分析的样点分布空间数据库,通过关键字段与各点不同土层土壤水分数据之间实现连接,形成与样点地理坐标匹配的属性数据。然后用 Arcgis 中的 Geostatistical Analyst 模块进行 Kriging 插值方法,根据理论变异函数模型对未测定区域土壤水分状况进行插值计算,生成整个梁峁坡面的土壤水分分布图。

3 结果与分析

3.1 土壤水分数据的统计分析

在建立变异函数理论模型之前,应对数据的统计学特征有一个初步的了解。通过 spss 统计分析软件对两次测量的样点的土壤水分数据进行传统统计学分析,其分析结果见表 1。

表 1 土壤水分含量的统计特征表

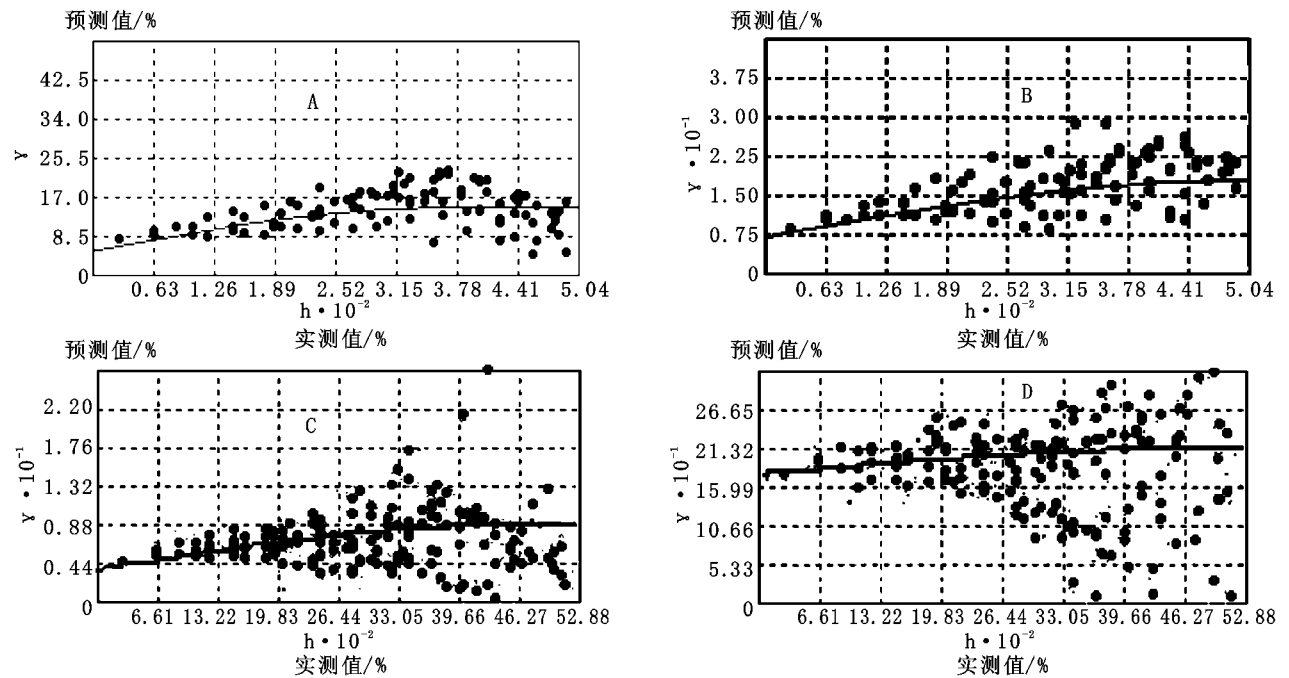
季节	土层/cm	样本数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	中值/%	标准差	变异系数/%	偏态系数	峰态系数
干季	0~ 30 cm	313	23.8	4.5	10.94	10.2	3.39	30.99	0.95	3.99
	30~ 60 cm	313	23.45	5.8	11.88	11.0	3.59	30.22	0.76	3.04
雨季	0~ 30 cm	313	19.8	6.4	10.84	10.5	2.58	23.8	0.78	3.43
	30~ 60 cm	313	15.5	5	7.84	7.8	1.41	17.98	0.77	5.26

表 1 可见,4 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量低于 30~ 60 cm 土层,变异系数高于 30~ 60 cm 土层,说明表层土壤较低的土壤水分含量和较高的变异程度,而底层土壤水分状况较好且变异程度较小,其原因在于表层较底层土壤蒸发强烈,土壤水分含量较少,且表层土壤含水量受气候因子影响强烈,变化程度较大。而 8 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量明显高于 30~ 60 cm 土层,变异系数高于 30~ 60 cm 土层,说明表层土壤有较高的土壤水分含量和较高的变异程度,其原因在于植物的生长的大量需水,致使底层土壤水分含量明显偏低。而雨季降水和土壤蒸发交互作用强烈,导致表层变异系数较高。

4 月、8 月表层土壤水分含量基本相当,而底层土壤水分含量 8 月明显低于 4 月,原因在于 8 月植物生长旺季降水量较少,植物生长大量吸收土壤水分,致使底层土壤水分大量减少。而土壤水分的变异系数 4 月明显高于 8 月,表明了雨季的降雨使土壤水分的空间变异程度弱化。

3.2 变异函数的结构分析

根据目前研究^[16]使用球状模型拟网格取样土壤水分含量最为合适,选择适当的线性变换矩阵对几何和带状各向异性结构进行坐标轴旋转、平移、变换,计算 $\gamma(h) - h$ 的散点图,见图 1,建立不同土层土壤水分的理论变异函数模型。



(a) 4 月 0~ 30 cm 土层; (b) 4 月 30~ 60 cm 土层; (c) 8 月 0~ 30 cm 土层; (d) 8 月 30~ 60 cm 土层。

图 1 变异函数散点图及变异曲线

表 2 变异函数模型参数值

季节	土层 / cm	模型	块金值	拱高	基台值	变程/a	结构比/%
4 月	0~ 30	球状	5.78	10.75	16.52	494.16	65.07
	30~ 60	球状	7.13	10.79	17.92	494.16	60.21
8 月	0~ 30	球状	3.34	4.96	8.30	515.82	59.76
	30~ 60	球状	1.72	0.39	2.11	515.59	18.48

由表 2 可看出, 8 月份基台值明显小于 4 月份, 尤其在 30~ 60 cm 土层, 基台值极低, 说明 8 月土壤水分较低的空间异质性程度, 结合降雨资料, 2005 年 7、8 月份降雨偏少仅为 89.2 mm, 而 2004 年同期为 139.5 mm, 植物生长大量需水但降雨量偏少, 表层土壤因降水的影响, 异质性降低, 而降水量无法补充底层土壤水分的亏缺, 造成底层土壤普遍干旱, 土壤水分的空间异质性程度降至低点。这种差异在块金值中也有所反映。

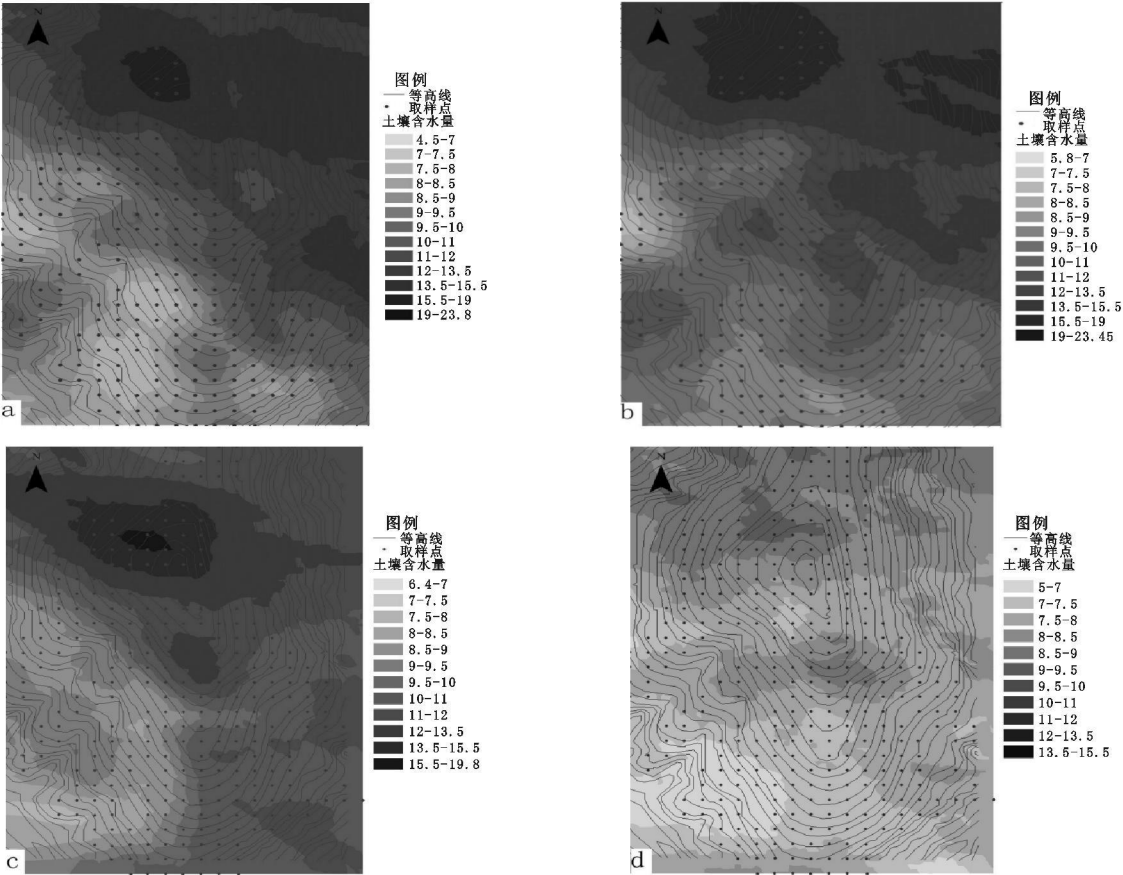
结构比 $[C_1/(C_0 + C_1)]$ 式中: C_0 ——块金值; C_1 ——拱高; C ——基台值; a ——变程。说明自相关部分引起的空间异质性程度的高低, 该比值 $> 75\%$, 说明系统具有强烈的空

间相关性; 比值在 25% ~ 75% 之间, 表明系统具有中等相关性; 比例 $< 25\%$, 说明系统相关性很弱。实验所得结构比在 55.94~ 65.07 之间(除 8 月份 30~ 60 cm 土层为弱相关性外), 说明实验区的土壤水分具有中等程度的空间相关性, 其空间变异主要是由土壤母质、地形、气候等非人为因素(空间自相关部分)引起的。4 月、8 月份, 0~ 30 cm 土层的结构比大于 30~ 60 cm, 表明表层土壤水分的空间自相关程度要强于底层, 主要由于表层土壤水分更易受地形、气候等因素的影响, 分布存在较强的规律性, 而且 8 月份的结构比要小于 4 月份, 原因与造成基台值差异的原因相似。

4 月份土壤水分变异函数变程为 494.16 m, 说明当土壤水分测点距离小于 494.16 m 时, 任意两点间的观测值有相关性, 相关性随距离的变大而减小, 当距离超过 494.16 m 时, 就不再具有相关性。同样, 8 月份同理。

3.3 土壤水分含量的空间分布格局(Kriging) 及分析

根据得到样本点的空间数据文件, 采用普通克立格法进行最优内插, 绘制土壤水分含量的空间格局图(kriging map), 如图 2。



(a) 0~ 30 cm 土层(4 月); (b) 30~ 60 cm 土层(4 月); (c) 0~ 30 cm 土层(8 月); (d) 30~ 60 cm 土层(8 月)

图 2 土壤水分空间分布图

如图 2 中所示, 总体呈现自东北向西南减小的趋势, 可见坡向是土壤水分空间变异的主导因子, 阳坡由于太阳辐射强度较大, 土壤水分蒸发强烈, 以至形成较低的土壤水分含量; 而阴坡水热条件适中, 植被长势较好, 土壤蒸发量小, 土壤水分条件较好。4 月 30~ 60 cm 土壤水分状况要好于 0~ 30 cm, 由于表层土壤受气象因素影响强烈, 测期正值干季, 强烈的土壤水分蒸发, 使表层土壤水分含量偏低。8 月 0~

30 cm 土壤水分状况要好于 30~ 60 cm, 原因在于雨季降水对表层土壤水分的补充与植被生长对底层土壤水分的消耗的共同作用, 使表层与底层的土壤水分差异加大。4 月、8 月 0~ 30 cm 土层土壤水分含量分布特点基本相似, 而底层 30~ 60 cm 土层土壤水分 8 月明显低于 4 月, 原因在于表层土壤水分的变异主要是由于地形因子和气候因子的作用引起的, 这些因子在 4 月和 8 月中相差不大, 而底层土壤水分主

要受植被因子影响,植被需水在生长初期和生长末期差异较大,以致底层土壤水分在 4 月、8 月份差异明显。

表 3 土壤水分分布面积统计表

时间	土层/cm	土壤水分 均值/%	土壤水分含量分布面积/%		
			< 10%	10%~ 15%	> 15%
4 月	0~ 30	10. 94	39. 6	57. 3	3. 2
	30~ 60	11. 88	22. 7	58. 9	18. 5
8 月	0~ 30	10. 84	30. 8	67. 7	0. 2
	30~ 60	7. 84	100	0	0

表 3 所示,4 月份 0~ 30 cm、30~ 60 cm 土壤水分平均值为 10. 94%、11. 88%,土壤水分含量多集中于 10~ 15% 之间,因为测量时间处于春季土壤水分强烈蒸发消耗期,土壤水分含量较低。而表层(0~ 30 cm)土壤水分含量< 10% 的区域占 39. 6%,土壤水分条件较差,深层的(30~ 60 cm)高含水区和低含水区面积相当,水分条件较为理想,基本能支撑生长初期的植物需水。

8 月份 0~ 30 cm、30~ 60 cm 土壤水分平均值为 10. 84%、7. 84%,表层土壤水分含量多集中于 10%~ 15% 之间,而底层土壤水分均低于 10%。因为测期处于植物生长季期,但降水量偏低,底层土壤水分被植物生长大量消耗,却得不到降水的深层补充,致使土壤水分含量极低,对植物生长不利。

4 结 论

对土壤水分数据的传统统计学分析,4 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量低于 30~ 60 cm 土层,变异系数高于参考文献:

[1] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2): 81– 85.

[2] 李海滨,伍业刚. 景观生态学的数量研究方法. 当代生态学博论[M]. 北京:中国科学技术出版社,1992. 209– 230.

[3] 王盛萍,张志强,武军,等. 土壤水分运动特征参数空间异质性: 理论分析、取样与影响因素[J]. 中国水土保持科学,2003,1(3): 95– 98.

[4] Loague, K. Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes[J]. Journal of Hydrology, 1992, 138: 385– 407.

[5] Campbell, J B. Spatial variation of sand content and Ph within single contiguous delineations of tow soil mapping units [J]. Soil Science, 1978, 34: 577– 597.

[6] 何志斌,赵文智,何志斌. 荒漠绿洲区人工梭梭林土壤水分空间异质性的定量研究[J]. 冰川冻土,2004,26(2): 208– 211.

[8] 白永飞,许志信,李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J]. 生态学报,2002,22(8): 1216– 1223.

[9] 王其兵,李凌浩,刘先华,等. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析[J]. 植物生态学报,1998,22(5): 409– 414.

[10] 李明辉,彭少麟,申卫军,等. 丘塘景观土壤养分的空间变异[J]. 生态学报,2004,24(9): 1839– 1845.

[11] Fitzjohn, C, Teman J L , Williams, A G. Soil moisture variability in a sem+arid gully catchment: implications for runoff and erosion control[J]. Catena, 1998, 32: 55– 70.

[12] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数[J]. 地理学报,2000,55(4): 428– 438.

[13] Warrick. A W, Zhang R, Moody, M M, et al. Kriging versus alternative interpolators: errors and sensitivity to model inputs[A]. In: Roth, K., Fluhler, H., Jury, W. A. , Parker, J. C. (Editors). Fieldscale water and solute flux in soils[M]. Birkhaser Verlage, Basel, 1990. 157– 164.

[14] 陈鹏,初雨,顾峰雪,等. 绿洲 荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析[J]. 应用生态学报,2003,14(6): 904– 908.

[15] 李笑吟,毕华兴,刘利峰,等. TRIME– TDR 土壤水分测定系统的原理及其在黄土高原土壤水分监测中的应用[J]. 中国水土保持科学,2005,3(1): 112– 115.

[16] 王政权. 地质统计学在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

30~ 60 cm 土层,由于表层较底层土壤蒸发强烈,土壤水分含量较少,且表层土壤含水量受气候因子影响强烈,变化程度较大。而 8 月份 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量明显高于 30~ 60 cm 土层,变异系数高于 30~ 60 cm 土层,其原因在于植物的生长的大量需水,致使底层土壤水分含量明显偏低,而雨季降水和土壤蒸发交互作用强烈,导致表层变异系数较高。而土壤水分的变异系数 4 月明显高于 8 月,表明了雨季的降雨使土壤水分的空间变异程度弱化,变异函数雨季小于旱季。

通过克立格插值方法,绘制坡面土壤水分分布图,可以看出梁卯坡土壤水分状况呈现自东北向西南减小的趋势,坡向是土壤水分空间变异的主导因子。4 月、8 月表层土壤水分含量基本相当,而底层土壤水分含量 8 月明显低于 4 月,原因在于 8 月植物生长旺季降水量较少,植物生长大量吸收土壤水分,致使底层土壤水分大量减少。

8 月份变异函数的块金值、拱高、基台值、结构比均小于 4 月份,尤其在 30~ 60 cm 土层,各参数值极低,体现了 8 月土壤水分较低的空间异质性程度,原因在于 8 月份,表层土壤因降水的影响,异质性降低。并且植物生长大量需水,降水量无法补充底层土壤水分的欠缺,造成底层土壤普遍干旱,土壤水分的空间异质性程度降至低点。

通过对不同土壤水分含量分布面积的统计分析,4 月份 0~ 30 cm、30~ 60 cm 土壤水分含量多集中于 10%~ 15% 之间,而 8 月份 0~ 30 cm 土壤水分含量多集中于 10%~ 15% 之间,而 30~ 60 cm 土壤水分均低于 10%,生长初期土壤水分能支持植物生长的需要,而生长旺季植被的耗水明显增强,从土壤中吸收的水分明显增加。