

晋西黄土区林草复合界面雨后土壤水分空间变异规律研究

云雷, 毕华兴*, 田晓玲, 马雯静, 崔哲伟

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//山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

摘要: 利用统计学方法对晋西黄土区林草复合系统界面上雨后表层(0~10 cm)、亚表层(10~20 cm)和 20~40 cm 土层土壤水分空间变异性进行研究。结果表明: 草地、林地以及二者组成的林草界面的土壤水分含量、变异系数差别均不大, 土壤水分含量随着深度的增加而减少, 但土壤水分变异系数则相反; 移动窗口法分析表明, 林草界面对表层和亚表层的土壤水分影响范围均为 4.0 m; 草地土壤质量含水量的变异函数模型可以拟合成高斯模型, 林地和林草界面则可以拟合球状模型, 草地土壤水分总体空间异质性要大于林地和林草界面, 草地土壤水分变异函数的平均变程为 10.96 m, 林草界面及林地土壤水分的平均变程分别为 5.37 m 和 4.31 m。对于描述界面土壤水分分布情况, 克立格制图直观性强, 具有良好效果。

关键词: 晋西黄土区; 林草复合界面; 土壤水分; 空间分布特征; 空间异质性

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0938-07

土壤水分是土壤—植物—大气连续体的一个关键因子, 是土壤系统养分循环和流动的载体, 它不但直接影响土壤的特性和植物的生长, 而且间接影响植物分布以及生态系统小气候的变化^[1]。黄土高原地区干旱少雨、蒸发强烈, 资源性缺水已经成为限制植物生长和分布的主要因素, 因此对于土壤水分的研究一直是黄土高原环境整治和生态建设的主要内容^[2-4]。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^[5]。土壤水分空间变异性研究一直是水文学、土壤学研究的热点之一^[6], 土壤水分具有高度的异质性, 研究的尺度不同, 其影响因子和变化规律也随之变化, 其异质性的存在对各种水文过程和土壤形成过程均有显著影响^[7-9]。在不同尺度上研究土壤水分空间格局, 对于了解植物根系情况、植被与土壤关系、植被空间格局等有着重要意义^[10-13]。而以往异质性的研究往往多注重于单一生态系统或多个生态系统之间的比较^[14-17], 对于复合系统内部的研究仍缺乏足够的理论依据。

林草复合是由森林和草地在空间上有机结合形成的复合人工植被或经营方式^[18], 是我国干旱与半干旱地区农林复合的主要模式之一^[19]。随着林草业的相互渗透及对生态环境综合治理的需要, 林草复合经营日益受到国内外的重视。本文以晋西黄土区林草复合界面为研究对象, 利用雨后土壤水分空

间测定数据, 应用地统计学方法对林草复合系统界面土壤水分的空间分布格局进行分析, 旨在揭示雨后复合系统土壤水分空间变异规律, 丰富和完善林草复合系统研究, 为晋西黄土区植物恢复、土地合理利用与生态建设提供一定的科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县, 地理坐标是 35°53'10" ~ 36°21'02" N, 110°27'30" ~ 111°07'20" E, 属典型的黄土残塬沟壑区。据吉县气象站资料, 吉县多年平均降水量 571 mm, 降水量季节分配不均, 4—10 月降水量为 521.4 mm, 占全年总降水量的 90.5%, 其中 6—9 月降水量占全年降水量的 70%左右, 冬季(12 月至次年 2 月)降水量平均为 16.7 mm, 占年平均降水量的 3%。土壤属黄土母质, 土层深厚, 土质均匀, 在剖面不同深度分布有钙积层石灰结核或假菌丝体。吉县境内植物资源比较丰富。常见的木本植物有 194 种, 分属于 49 个科; 草本植物 180 种, 分属于 44 个科(不包括农作物)。主要造林树种为刺槐(*Robinia pseudoscacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、苹果(*Malus pumila*)和核桃(*Juglans regia*)等。研究对象是刺槐和天然草的林草复合系统, 试验区位于吉县蔡家川流域中部(36°16'24" N, 110°45'44" E), 海拔 1036 m, 坡向为南偏东 34°, 坡度为 20°。刺槐林龄为 16 年, 密度为 800 株·hm⁻², 郁闭度为 75%, 林木平均高为 7.1 m, 胸径为 8.3 cm, 枝下高为 1.5 m。林草复合系统的植物种类主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、白羊草(*Bothriochloa ischcemum*)、艾蒿(*Artemisia*

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0503)

作者简介: 云雷(1982年生), 男, 博士研究生, 从事复合农林学研究。E-mail: lepidus_qq@126.com

*通讯作者: 毕华兴, 教授, 博士生导师。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2010-02-12

argyi)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、老鹳草(*Geranium wilfordi*)、堇菜(*Viola verecunda*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、紫花地丁(*Viola philippica*)、抱茎苦苣菜(*Ixeris sonchifolia*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、杠柳(*Periploca sepium*)和酸枣(*Periploca sepium*)等。

2 研究方法

2.1 观测取样点布置

研究对象是刺槐林地复合系统,参照尤文忠^[20]等人的研究,在试验区沿刺槐林边缘(距林带 0.5 m)分别向林内、草地设置 10 m×10 m 的样地各 1 块,在样地内采用网格状布设 80 块 0.5 m×0.5 m 样方,全区共设置样点 160 个,为研究方便,规定刺槐林边缘向草地方向为负方向,向林地方向为正方向,具体见图 1。

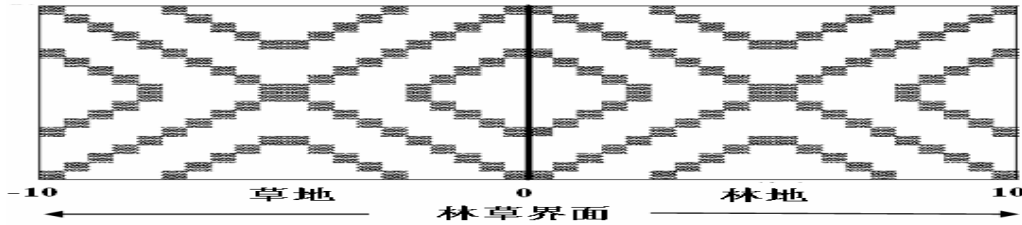


图 1 土壤水分监测点布设图

Fig.1 The setting of soil moisture monitoring

半窗口,通过计算比较两个半窗口内样点间的相异性。然后,窗口顺序向后移动一个样点,再计算半窗口间的相异系数,直到整个样线上的所有样点都参与计算为止。本文采用欧氏距离的平方(D_{SE})表示相异性,然后以 D_{SE} 为纵坐标,样点位置为横坐标作图,根据半峰宽法来判定影响域^[27]。

3 结果与分析

3.1 林草界面土壤质量含水量的统计分析

林草界面土壤质量含水量的统计分析由表 1 可见,土壤水分含量最小值在 9.50%~16.13%之间,最大值在 19.55%~21.47%之间,平均值在

2.2 土壤水分的测定

调查时间在 2008 年 9 月中旬降雨 72 h 之后,降雨量为 21.0 mm(降水量用简易雨量筒实测)。在每块样方的中心位置利用土钻分别在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 三层取样,每块样地取样 240 个,两块样地共取样 480 个,利用烘干法(105℃)测定土壤质量含水量。

2.3 数据处理

主要采用统计学方法和移动窗口法对数据进行处理:统计学分析中,主要利用传统统计学中的平均数、标准差、变异系数、最小值、最大值等分析和地统计学中的基台值、变程、块金和分维数等来描述土壤水分空间异质性。

移动窗口法^[21]用来界定边界的影响域,已经取得一定的应用^[22-26]。该方法是将分割窗平分分为两个

15.77%~18.79%之间,草地、林地和二者组成的林草界面,从 0~10 cm(表层)到 10~20 cm(亚表层),再到 20~40 cm 土层土壤水分含量均为逐渐降低的,草地与林地的土壤水分含量都相差不多(相应层次差值均小于 1%)。土壤水分的变异系数差别均不大,相对而言草地土壤水分含量变异性最大。所有类型表层和亚表层土壤水分含量均为弱变异性程度,20~40 cm 土层土壤水分含量均为中等变异性,各类型内相应变异系数随着深度的增加而变大,这主要是因为在小尺度范围内雨水是影响土壤水分的主要因素,由于外界环境不同,雨水下渗的

表 1 土壤质量含水量测定结果统计特征
Table 1 Statistical characters of mass water content of soil

类型	土壤深度(d)/ cm	土壤水分/%				标准差	变异系数/%	偏度	峰度
		最大值	最小值	平均值	中位数				
草地	0<d≤10	20.83	15.76	18.15	18.15	1.35	7.43	0.22	-0.90
	10<d≤20	20.30	14.15	17.44	17.44	1.41	8.11	-0.42	-0.49
	20<d≤40	21.24	10.27	16.34	16.34	2.57	15.72	-0.30	-0.37
林地	0<d≤10	21.47	16.13	18.79	18.73	1.34	7.14	0.02	-0.62
	10<d≤20	20.49	14.00	17.82	17.69	1.35	7.56	-0.27	-0.21
	20<d≤40	19.55	9.50	15.77	16.12	2.23	14.14	-0.75	0.27
林草界面	0<d≤10	21.47	15.76	18.47	18.37	1.38	7.47	0.10	-0.79
	10<d≤20	20.49	14.00	17.63	17.67	1.39	7.88	-0.36	-0.32
	20<d≤40	21.24	9.50	16.05	16.25	2.41	15.04	-0.42	-0.05

速度不同,从而导致下层土壤水分变异系数大于表层和亚表层。

3.2 林草界面土壤质量含水量水平分布及影响域的判定

从图2可知,在林带两侧不同距离的水平上,在0~10 cm的表层、10~20 cm的亚表层和20~40 cm土层,土壤水分含量分布具有相似的规律,但20~40 cm土层波动情况明显大于表层和亚表层。在草地方向,由林带到距林带8.5 m处的草地内,水分含量有升高的趋势,而由8.5 m处到距林缘10 m处,水分含量则呈逐渐降低的趋势,整体呈“反勺子”形状。在林地方向,水分则在由林带到距林带1 m和6 m处的草地内有明显水分低值点,整体呈“W”形状。

分析表明,移动窗口法较好地揭示林草复合界面表层和亚表层土壤质量含水量的影响域(20~40 cm层次土壤质量含水量影响域不明显)。对于土壤表层和亚表层土壤质量含水量,当窗口宽度 ≥ 8 时,各土层的含水量变化趋于一致(图3),即欧氏距离平方在最小单位为8时能够清晰地判定边界影响域。根据半峰宽法判定,土壤表层水分的边界影响

域从草地2.5 m到林地1.5 m,影响域宽度为4.0 m;土壤亚表层水分的边界影响域从草地2.5 m到林地1.5 m,影响域宽度为4.0 m。当窗口宽度为8时,在SED曲线上有3个明显的波峰出现,除边界附近外,在其它样点也有稳定波峰出现,如林地内距边界5.5 m处和草地内距边界6.5 m的波峰一直是稳定的。说明该处样点的土壤水分与其它样点的土壤水分有明显差异。其原因可能是光照、温度和植被等因子的影响,也可能是多种因子共同作用的结果,具体原因还有待进一步研究。

3.3 林草界面土壤质量含水量的地统计学分析

变异函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能会使变异函数产生比例效应^[28],使实验变异函数产生畸变,因此需要判断土壤水分数据的分布类型,分析结果如图4所示,草地和林地不同土壤层次的土壤水分含量数据接近正态分布,满足地统计学所要求的假设条件,可以进行地统计学分析。

由表2、图5可知,林地表层、亚表层和20~40 cm土层土壤质量含水量的变异函数模型可以拟合成球状模型;草地表层、亚表层和20~40 cm土

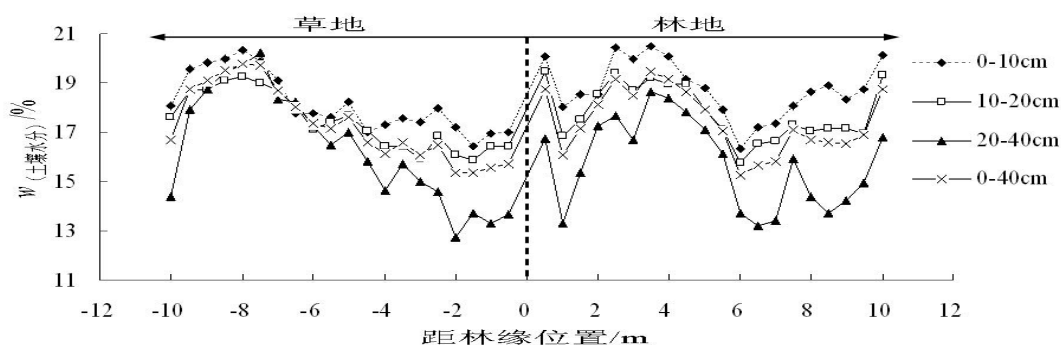


图2 林草界面土壤质量含水量水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of mass water content of soil in forest-grassland boundary

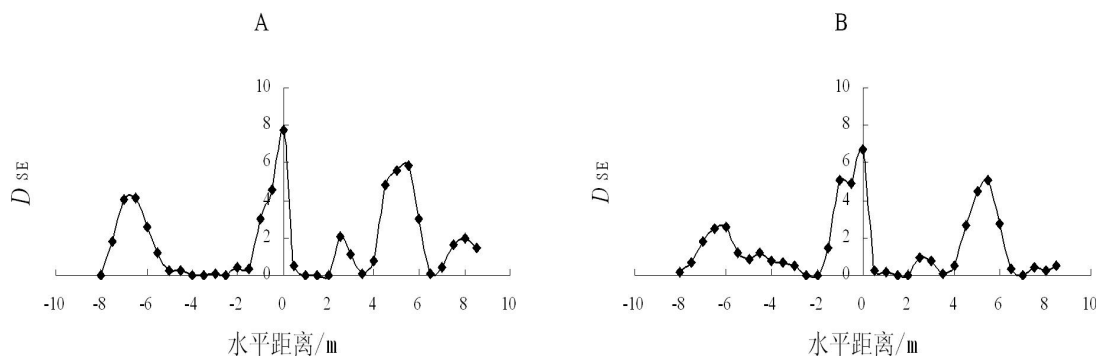


图3 林草界面土壤表层(A)和亚表层(B)质量含水量的影响域

Fig.3 Width of edge influence of forest-grassland boundary on mass water content of soil of surface layer(A) and subsurface layer(B)

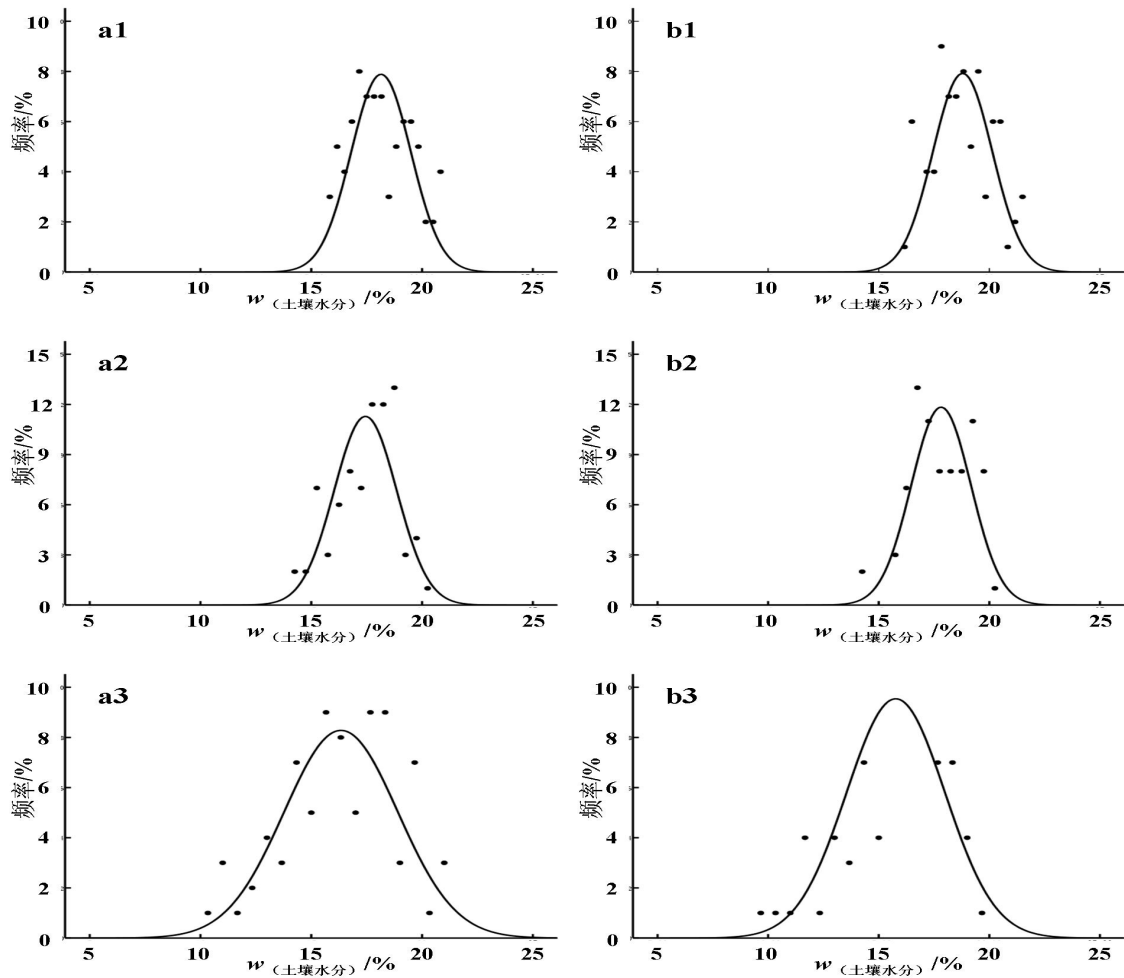


图4 土壤质量含水量频率分布图

Fig.4 Frequency histograms of mass water content of soil

注：a 为草地，b 为林地；1~3 分别代表 $0 < d \leq 10$ cm， $10 \text{ cm} < d \leq 20$ cm 和 $20 \text{ cm} < d \leq 40$ cm 土层

表2 林草景观界面土壤质量含水量的变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariogram model and parameters for mass water content of soil in forest-grassland boundary

类型	土壤层次 (d) / cm	模型	结构方差 C	块金值 C_0	基台值 C_0+C	(块金值/基台值)/ %	变程/ m	决定系数	分维数 D
草地	$0 < d \leq 10$	高斯模型	3.158	0.603	3.761	16.03	12.99	0.927	1.643
	$10 < d \leq 20$	高斯模型	2.297	0.742	3.039	24.42	9.44	0.944	1.731
	$20 < d \leq 40$	高斯模型	10.330	1.500	11.830	12.68	10.44	0.970	1.622
林地	$0 < d \leq 10$	球状模型	2.033	0.277	2.310	11.99	3.40	0.962	1.810
	$10 < d \leq 20$	球状模型	1.046	0.895	1.941	46.11	4.96	0.833	1.877
	$20 < d \leq 40$	球状模型	3.647	1.650	5.297	31.15	4.58	0.819	1.842
林草 界面	$0 < d \leq 10$	球状模型	1.625	0.420	2.045	20.54	4.86	0.781	1.851
	$10 < d \leq 20$	球状模型	1.344	0.735	2.079	35.35	5.45	0.592	1.893
	$20 < d \leq 40$	球状模型	4.520	1.250	5.770	21.66	5.79	0.749	1.837

层土壤质量含水量的变异函数模型可以拟合成高斯模型；林地与草地组成的林草界面表层、亚表层和 20~40 cm 土层土壤水分含量的变异函数模型可以拟合成球状模型。

C_0 表示块金值，是由随机因素和实验误差共同引起的变异^[29-30]，分析表明草地的块金值略大于林地和林草界面，无论是草地、林地和林草界面，块金值

都是随着深度的增加而增大，说明随着土层深度的增加，随机因素或实验误差所引起的空间变异增大。

块金方差与基台值之比($C_0/(C+C_0)$)表示自相关部分引起的空间异质性程度的高低，Cambardella 等^[31]研究认为： $C_0/(C+C_0) > 75\%$ ，说明系统空间自相关性很弱，反映出随机部分引起的空间异质性程度起主要作用；比值在 25%~75%之间，表明系统

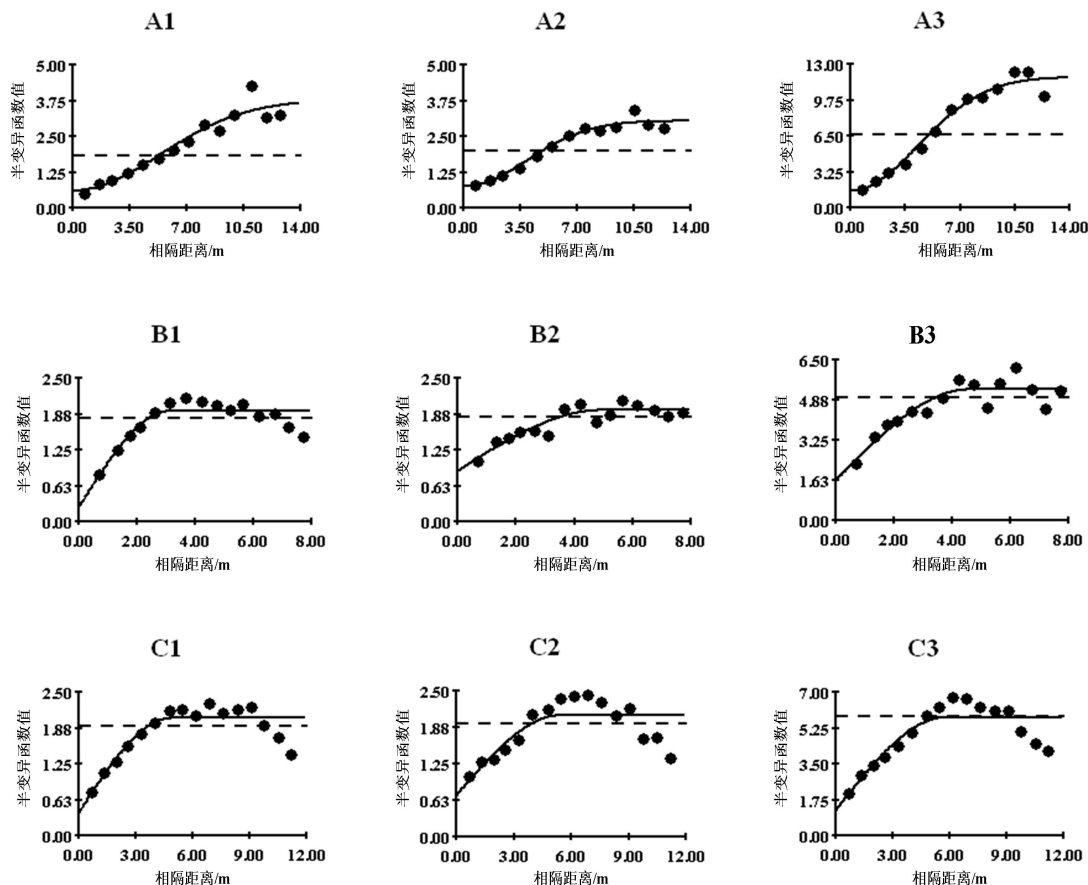


图5 土壤质量含水量的变异函数

Fig.5 Semivariograms for mass water content of soil

注: A.草地, B.林地, C.林草界面; 1~3 分别代表 $0 < d \leq 10$ cm, $10 < d \leq 20$ cm 和 $20 < d \leq 40$ cm 土层

具有中等程度空间自相关性; $C_0/(C+C_0) < 25\%$, 说明系统具有强烈的空间相关性。研究表明, 林地土壤水分结构比在 11.99%~46.11% 之间, 表层空间自相关性强, 亚表层和 20~40 cm 土层为中等程度空间自相关; 草地土壤水分结构比在 12.68%~24.42% 之间, 具有强烈的空间自相关; 林草界面土壤水分结构比在 20.54%~35.35% 之间, 表层和 20~40 cm 土层为强烈的空间自相关, 亚表层为中等程度空间自相关。相比较而言草地的结构比最小, 表明草地的空间自相关程度最强, 这主要是由于草地土壤水分更易受外界环境因素的影响。

变程反映了变量空间自相关范围的大小, 同时提供了研究某种属性相似范围的一种测度。在变程之内, 变量具有空间自相关特性, 反之则不存在。在草地、林地和二者组成的林草界面内, 土壤因子的空间相关范围差异明显, 草地土壤水分的平均变程较大, 为 10.96 m, 而林草界面林地土壤水分的平均变程较小, 分别为 5.37 m 和 4.31 m。分维数 D 是一个无量纲数, D 的大小表示变异函数曲线的曲率, D 越小, 格局变异的空间依赖性越强, 反之由

随机因素引起的异质性占有较大的比重。相比较而言, 草地分维数较小, 分别为 1.643、1.731 和 1.622, 表明草地格局变异的空间依赖性比林地和林草界面较强。

3.4 林草界面土壤质量含水量的空间局部估计

对林草景观界面土壤表层、亚表层和 20~40 cm 土层土壤质量含水量进行克立格制图 (图 6), 可以看出这三个层次土壤水分分布具有一定的相似性, 林草界面土壤水分含量呈高、低斑块混合镶嵌的分布, 这主要是由于降雨在下渗过程中, 受冠层截留、植被盖度和植物根系等作用的综合影响, 各处入渗速度不一致造成的。可以看出克立格制图可以较好地显示出界面土壤水分的空间分布格局。

4 结论

研究区土壤水分数据的传统统计学分析, 草地、林地和二者组成的林草界面, 土壤水分含量随深度增加而逐渐降低, 草地、林地以及二者组成的林草界面的土壤水分含量、变异系数差别均不大, 这与降雨有关, 而各类型内相应变异系数随着深度的增加而变大, 则是由于雨水下渗速度差异造成的。

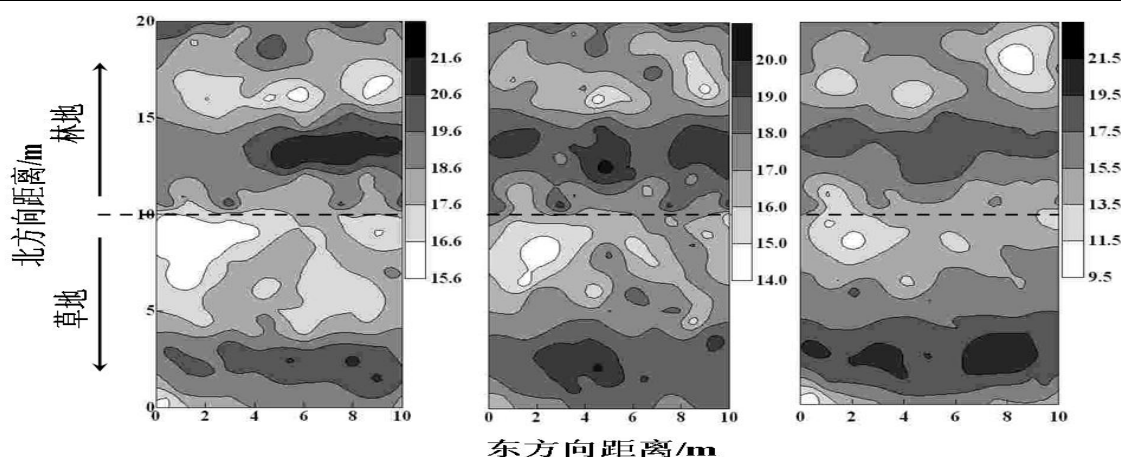


图6 林草界面土壤质量含水量空间分布图

Fig.6 Kriging maps for mass water content of soil in forest-grassland boundary

注：从左到右依次代表表层（ $0 < d \leq 10 \text{ m}$ ），亚表层（ $10 \text{ m} < d \leq 20 \text{ m}$ ）和 $20 \text{ m} < d \leq 40 \text{ m}$ 层次的土壤质量含水量的空间分布图

林草复合界面土壤表层水分的边界影响域从草地 2.5 m 到林地 1.5 m，影响域宽度为 4.0 m；土壤亚表层水分的边界影响域从草地 2.5 m 到林地 1.5 m，影响域宽度为 4.0 m，这主要与刺槐根系分布和外界环境状况（如光照）有关。

地统计学分析结果表明，林地和林草界面土壤质量含水量的变异函数模型可以拟合球状模型，草地土壤质量含水量的变异函数模型合成高斯模型；相比较而言草地变异函数总体的空间自相关性和空间依赖性均大于林地和林草界面，其总体的空间异质性要大于林地和林草界面，草地土壤水分变异函数的平均变程为 10.96 m，而林草界面林地土壤水分的平均变程分别为 5.37 m 和 4.31 m。

通过克里格制图，将土壤水分的点数据转化为面数据，直观描述土壤水分在空间上的分布、形状、大小和位置，较好地体现了复合系统界面土壤水分的分布规律。当然，林草复合界面土壤水分的空间变异规律还需要长期监测，才能得出更加科学合理的结论。

参考文献：

- [1] 黄志刚, 李瑞峰, 曹云, 等. 南方红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 1937-1944.
HUANG Zhigang, LI Ruifeng, CAO Yun, et al. Dynamics of soil water under Eucommia ulmoides plantation in hilly red soil region of southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 1937-1944.
- [2] 余优森, 林日暖, 邓振镛, 等. 人工草地土壤水分周年变化规律的研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 175-181.
YU Yousen, LIN Rinuan, DENG Zhenyong, et al. Annual variation of soil water in artificial sward[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 175-181.
- [3] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 411-414.
HUANG Mingbin, KANG Shaozhong, LI Yushan. Evolution of moisture environment of small watershed in gully region of Loess Pla-

- teau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(4): 411-414.
- [4] 王孟本, 李洪建. 林分立地和林种对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 43-46.
WANG Mengben, LI Hongjian. Effects of stand sites and forest types on soil water contents in artificial forests[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(6): 43-46.
- [5] 李哈滨, 伍业刚. 景观生态学的数量研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 209-233.
LI Habin, WU Yegang. The Scalar Research of Landscap Ecology[M]. Beijing: Science Press, 1992: 209-233.
- [6] WESTERN A W, RODGER B G. The tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristic sand hydrological flux measurements[J]. Water Resources Research, 1998, 34(10): 2765-2768.
- [7] ANDREWW, WESTERN, ZHOU S L, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2004, 286: 113-134.
- [8] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005, 14(4): 507-511.
CHEN Hongsong, SHAO Mingan, WANG Kelin. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 14(4): 507-511.
- [9] 杨弘, 裴铁瑛, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林土壤水分动态研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 587-591.
YANG Hong, PEI Tiefan, GUAN Dexin, et al. Soil moisture dynamics under broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 587-591.
- [10] WALKER J P, WILLGOOSE G R, KALMA J D. One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations: a comparison of retrieval algorithms[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24: 631-650.
- [11] TANSEY K J, MILLINGTON A C, BATTIKHI A M, et al. Mointoring soil moisture dynamics using satellite radar in northeastern Jordon[J]. Applied Geography, 1999, 19: 325-344.
- [12] LEGENDER P, FORTIN M J. Spatial pattern and ecological analysis[J]. Vegetation, 1989, 80: 107-138.
- [13] FORTIN M J, DRAPER P, LEGENDRE P. Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology[J]. Vegetation, 1989, 83: 209-222.
- [14] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influ-

- encing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715-720.
- [15] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 不同土地利用方式下沙地土壤水分空间变异规律[J]. 生态学报, 2003, 22(6): 43-48.
CHEN Fusheng, ZENG Dehui, CHEN Guangsheng, et al. Comparative analysis on spatial patterns of soil moisture under different land use types in Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 43-48.
- [16] 王云强, 张兴昌, 从伟, 等. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 65-71.
WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, CONG Wei, et al. Spatial variability of soil moisture on slope-land under different land uses on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 65-71.
- [17] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2007, 26(1): 100-107.
QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 43-48.
- [18] 曾艳琼, 卢欣石. 林草复合生态系统的研究现状及效益分析[J]. 草业科学, 2008, 25(3): 33-36.
ZENG Yanqiong, LU Xinshi. Current advance and benefits of tree-grass complex system researches[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(3): 33-36.
- [19] 宋兆民, 孟平. 中国农林业的结构与模式[J]. 世界林业研究, 1993, (5): 77-81.
SONG Zhaomin, MENG Ping. The structure and pattern of agroforestry in China[J]. World Forestry Research, 1993, (5): 77-81.
- [20] 尤文忠, 曾德慧, 刘明国, 等. 黄土丘陵区林草景观边界雨后土壤水分空间变异规律[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1951-1956.
- [21] WHITTAKER R H. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California[J]. Ecological Monographs, 1960, 30: 279-338.
- [22] 石培礼, 李文华. 生态交错带的定量判定[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 586-592.
SHI Peili, LI Wenhua. Quantitative methodologies for ecotone determination[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 22(4): 586-592.
- [23] 石培礼, 刘兴良. 游动分割窗技术在生态交错带定量判定中的应用: 以四川巴郎山岷江冷杉林线为例[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 189-194.
SHI Peili, LIU Xingliang. The application of moving split-window technique in determining ecotone: A case study of abiesfaxoniana timberline in baling mountain in Sichuan province[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(2): 189-194.
- [24] 李丽光, 何兴元, 李秀珍, 等. 岷江上游干旱河谷农林边界影响域的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1804-1808.
LI Liguang, HE Xingyuan, LI Xiuzhen, et al. Depth of edge influence on agriculture-forestry boundary in arid valley of upper reaches of Minjiang River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1804-1808.
- [25] 朝鲁蒙, 王进鑫, 侯琳, 等. 黄土高原不同植被复合边界土壤水分分布及影响域[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 28-32.
CHAO Lumeng, WANG Jinxin, HOU Lin, et al. Distribution of soil water and distance of edge influence at different vegetation compound boundary[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(3): 28-32.
- [26] 云雷, 毕华兴, 任怡, 等. 晋西黄土区果园间作界面土壤水分分布[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 70-73.
YUN Lei, BI Huaxing, REN Yi, et al. Soil moisture distribution at fruit-crop intercropping boundary in the Loess region of western Shanxi[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(9): 70-73.
- [27] SAUNDERS S C, CHEN J, DRUMMER T D, et al. Modeling temperature gradients across edges over time in a managed landscape[J]. For Ecol Man, 1999, 117: 17-31.
- [28] VOEORA S R, HATFIELD J L, NIELSEN D R, et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties[J]. Hilgardia, 1982, 51: 1-75.
- [29] CHIEN Y J, HUANG S H, et al. Geostatistics analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils[J]. Soil Sci, 1997, 162: 291-298.
- [30] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58: 1246-1266.
- [31] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 1501-1511.

Research on spatial heterogeneity of soil moisture after raining at forest-grassland boundary in the Loess region of west Shanxi

YUN Lei, BI Huaxing, TIAN Xiaoling, MA Wenjing, CUI Zhewei

College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University//Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education//National Field Research Station of Forest Ecosystem, Jixian, Shanxi. Beijing 100083, China

Abstract: The spatial variability of different layers (0-10 cm, 10-20 cm and 20-40 cm) soil moisture after raining at the forest-grassland boundary in the Loess Region of West Shanxi were studied by using statistical method. The results showed that the differences of soil moisture content and variation coefficient among the different landscape types, but the differences were not significant. Soil moisture content was decreased with the increased depth of soil in vertical direction, but variation coefficient of soil moisture was just the opposite; By using moving split-window techniques, it was obtained that the width of edge influence in surface (0-10 cm) and subsurface (10-20 m) layer was 4.0 m, respectively. The model of soil moisture variation in different layers were gaussian model in grassland, spherical model in forestland and forest-grassland boundary. The total spatial heterogeneity of soil moisture was higher in grassland compared with forestland and forest-grassland boundary. The average ranges of soil moisture variation in grassland, forestland and forest-grassland boundary were 10.96 m, 5.37 m and 4.31 m, respectively. Kriging map gives a very strong visual impression, it obtains good results in expressing the spatial structural characters.

Key words: Loess region of west Shanxi; forest-grassland boundary; soil moisture; spatial distribution characteristics; spatial heterogeneity