

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.013

# 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性\*

余冬立<sup>1,2</sup> 邵明安<sup>2</sup> 俞双恩<sup>1</sup>

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**【摘要】** 通过对黄土区农草混合利用坡面的土壤水分分析,研究土地利用结构对土壤水分空间变异特性的影响。结果表明,研究区坡面土壤水分呈中等变异,且农草混合利用结构明显增加了土壤水分的空间变异强度,坡面土壤水分具有明显空间结构性。干湿条件下坡面0~60 cm土层平均含水率的半方差最优理论模型分别为高斯模型和球状模型,且干旱条件较湿润条件下保持较高的基台值和变程,而块金值/基台值相对较低。Kriging插值结果显示坡面土壤水分呈现差异显著的斑块状分布格局,与坡面的混合土地利用结构一致。研究区浅层土壤水分空间变异及其分布格局主要受地形、降水和土地利用方式及其结构等因素的影响。

**关键词:** 土壤水分 农草混合结构 空间变异性

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0057-07

## Spatial Variability of Soil Water Content on a Cropland-grassland Mixed Slope Land in the Loess Plateau, China

She Dongli<sup>1,2</sup> Shao Ming'an<sup>2</sup> Yu Shuang'en<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-drainage and Agricultural Soil-water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Abstract

The effects of land use structure on the spatial variation characteristics of soil water content were studied based on the survey of soil water condition on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau. The results showed that the soil water content presented a moderate spatial variability on the slope scale. The cropland-grassland mixed land use structures significantly increased the spatial variability of soil water contents. The soil water content had obvious spatial structure. The Gaussian model and Spherical model were the best fitting descriptors for the mean soil water content of 0~60 cm soil depth under arid and moist condition respectively. Compared to the moist condition, the mean soil water content had a higher sill and range, but a lower nugget-to-sill ratio under dry condition. The interpolation map by Kriging method showed that soil water content presented a significant different plaque distribution pattern, which was consistent with the mixed land use structure on the slope. The difference in the spatial variability and distribution pattern of soil water content (0~60 cm) in the test area mainly were effected by topography, precipitation, land use and land use structure.

**Key words** Soil water content, Cropland-grassland mixed land use structure, Spatial variability

收稿日期: 2009-09-14 修回日期: 2009-10-29

\* 国家自然科学基金资助项目(90502006)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-250)和河海大学自然科学基金资助项目(2009422411)

作者简介: 余冬立, 讲师, 主要从事土壤空间变异与侵蚀控制研究, E-mail: shedongli@gmail.com

通讯作者: 邵明安, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤学研究, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

## 引言

土地利用结构/覆被变化是全球变化研究的热点问题之一。土地利用结构变化能够引起如土壤水分、土壤养分、土壤生物以及各种物质的地球化学循环等许多自然现象和生态过程发生变化<sup>[1]</sup>。土壤水分是土壤侵蚀过程、作物生长和生态环境建设的关键影响因素之一,也是土地评价的主要因素之一,其异质性对水土流失、水-热-溶质耦合运移和土壤-植被-大气传输体(SVAT)中的物质迁移等水文学过程以及土壤形成过程均有显著的影响<sup>[1]</sup>。黄土高原坡面土壤水分是植物生长和植被恢复的主要限制因子,其空间变异特征是植被合理配置和提高土壤水库功效的基础。许多学者对黄土坡面土壤含水率空间变异性进行了研究<sup>[2-3]</sup>。已有的研究大都为单一土地利用方式与土壤含水率空间变异性之间的关系研究,而对多种方式混合利用的坡面结构下土壤含水率空间变异性的研究相对较少。为此,本文在黄土高原选择一典型农草混合利用的坡面,在湿润和干旱两种条件下研究浅层土壤水分空间结构及其分布特征,以期为黄土高原区植被恢复和生态建设提供理论参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验选在中国科学院水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,该区位于陕西省神木县以西14 km处的六道沟小流域,北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。该流域面积6.89 km<sup>2</sup>,东经110°26',北纬38°49',属于典型的半干旱地区,平均干燥度为1.8,年降水量为250~450 mm,且6~9月可占全年降水量的70%~80%,年平均蒸发力785.4 mm。该区地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵,主要土壤类型有棉沙土、硬黄土、红土、风沙土以及坝地淤土,植被类型属于灌丛草原类型,天然植被大部分已遭破坏,经人工整治,现已逐渐进入以长芒草-草木樨状黄芪-达乌里胡枝子-茵陈蒿-柠条为主的植被演替阶段<sup>[1]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 采样点布置

在研究区选择一个典型坡面,从中选择地形条件相对一致,面积5400 m<sup>2</sup>(60 m×90 m)的样地进行研究。采用线状样带取样方式,沿坡面横向自左到右间隔15 m依次选取4条纵向样带,长度90 m。在样带上每隔5 m设一取样点,共设样点72个。

4条取样带土地利用结构依次为:A:草地-草地-草地,B:农地-农地-农地,C:草地-农地-草地,D:草地-农地。图1为采样点的分布图。

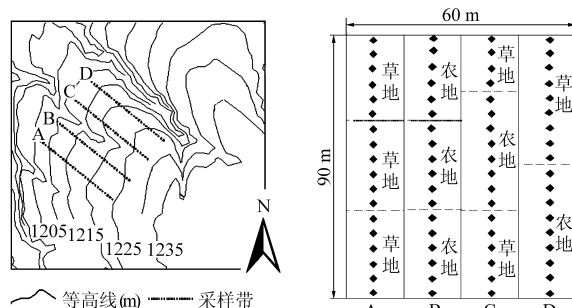


图1 采样点分布图

Fig. 1 Sample distribution

#### 1.2.2 采样及测定方法

分别于2007年4月18~20日(干旱)和2008年6月17~19日(湿润,采样前次降雨量为70 mm)在每个采样点采用土钻进行分层取样,0~10 cm土层深度每隔5 cm取一个样品,10~60 cm土层深度每隔10 cm取一个样品,采用烘干法(105℃,10 h)测定土壤含水率。农地管理为一般大田作物管理;草地植被为退耕35~36年的苜蓿,基本退化为长芒草。同时利用便携式GPS和罗盘测定每个样点的坡度、坡向和海拔等地形因子。

#### 1.2.3 数据处理方法

土壤水分的空间变异研究主要采用经典统计学和地统计学方法,所用统计计算及模型的拟合在SPSS和GS+软件中完成。对变异系数、空间自相关、半变异函数、最优模型和分维数等计算过程说明参照文献[4]。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 坡面土壤水分状况与合理采样数估算

土壤水分的描述性统计结果如表1所示。旱季初期干旱条件下0~60 cm土层平均含水率为7.46%,接近土壤凋萎含水率;雨季来临后在降水补充下(测定前连续降雨70 mm),土壤含水率的平均值为15.10%。变异系数 $C_v$ 反映了特性参数的空间变异程度,0~60 cm土层平均含水率均表现为中等变异,但干旱条件下变异系数(32.9%)明显大于湿润条件下土壤水分变异系数(12.8%)。这与Qiu等在大南沟流域研究的结果一致<sup>[5]</sup>。

土壤水分的垂直分布不仅受土壤质地、土壤结构等内部因素的控制,降雨、蒸发、土地利用类型和植被等环境因子也对其产生深刻的影响。受强烈蒸发的影响,干旱条件下土壤含水率的垂直变化表现为增长型,表层5 cm土壤含水率最低(4.17%),已

表 1 土壤水分的描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of soil water content for all sampling points

土层深度 /cm	2007 年 4 月 18 日(干旱)					2008 年 6 月 17 日(湿润)				
	平均值/%	标准误	变异系数/%	K-S 值	合理取样数	平均值/%	标准误	变异系数/%	K-S 值	合理取样数
0~5	4.17	0.23	46.5	0.40	83	15.24	0.27	14.8	0.17	8
5~10	7.42	0.31	35.4	0.18	48	16.13	0.30	15.8	0.71	10
10~20	8.06	0.31	33.1	0.46	42	18.32	0.37	17.1	0.47	11
20~30	8.26	0.32	32.8	0.52	41	17.10	0.30	15.1	0.77	9
30~40	8.12	0.34	35.5	0.13	48	15.50	0.41	22.2	0.78	19
40~50	8.09	0.37	38.4	0.22	57	12.73	0.55	36.4	0.54	51
50~60	8.11	0.37	38.4	0.25	57	10.71	0.53	41.8	0.14	67
0~60	7.46	0.29	32.9	0.14	42	15.10	0.23	12.8	0.28	6

低于土壤凋萎含水率。湿润条件下,降水补充上层土壤水分,0~20 cm 土层土壤水分随着土层深度增加而增加,而 20 cm 土层以下土壤水分随着土壤深度的增加而降低。土壤水分变异系数的剖面特征同样受干湿条件的影响,与土壤含水率的剖面分布趋势相反,即在干旱条件下土壤水分变异系数最大值出现在表层 5 cm(46.5%),而在湿润条件下各层土壤水分之间的变异系数值在 14.8%~41.8% 之间,且随着土层深度增加,变异系数逐渐增大。通过计算,各层土壤平均含水率与变异系数之间相关系数分别为 -0.870 ( $p < 0.05$ ) (干旱)和 -0.907 ( $p < 0.01$ ) (湿润)。

单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫(one-sample Kolmogorov-Smirnov(K-S))非参数检验表明,在 0.05 检验水平下,各层土壤含水率均服从正态分布(表 1)。因此,在一定的精度( $j$ )要求下,研究区域的合理取样数( $N_r$ )可以计算为

$$N_r = \mu_a^2 \left( \frac{C_v}{j} \right)^2$$

式中  $\mu_a$ ——一定置信水平下的  $t$  分布值

$j$ ——研究要求的相对精度

在置信水平为 95%,相对精度  $k = 10\%$  时计算的各土层合理取样数如表 1 所示。不同水分条件,合理取样数差异明显,干湿条件下 0~60 cm 土层合理取样数分别为 42 和 6。在土壤剖面,合理取样数的分布与土壤水分的变异系数分布规律一致,干旱条件下表层的合理取样数最大,为 83;而湿润条件下,表层要求的合理取样数最小,为 8,且随着土壤深度的增加合理取样数增加。本次研究实际取样数为 72,因此除了干旱条件下表层 5 cm 外,其他各层次都达到了合理取样数的要求。由此可见,在一定的研究区域内,由于各种外界因素的影响,土壤性质空间变异的强度可以随时间和土层深度发生变化。

在这种情况下,要适时准确地获取参数,合理采样数目也会发生相应的变化,这在获取某些水文和土壤物理模型参数时应注意。

## 2.2 坡面土壤水分分布

土壤水分沿坡长方向变化受坡面土地利用结构影响而不同(图 2)。4 条样带代表了研究区域较为典型的 4 种坡面土地利用结构。单一土地利用方式下 A 列(草地-草地-草地)和 B 列(农地-农地-农地)的土壤含水率表现出沿坡长增加方向呈波浪式的变化规律,整体上有增加趋势(图 2)。经分析,造成单一土地利用结构样带土壤水分有此规律的原因主要是:①微地形特别是坡度影响地表径流和壤中流,从而影响水分的分布特征。整个研究坡面的坡度并非完全一致,处于相对平缓的测点,特别是在坡顶,保持水分能力相对较强,而在坡面中部坡度相对较陡,地表径流和壤中流作用增强,土壤水分较低。②土壤质地不同。取样时发现,在 40~60 cm 深处普遍存在多年沉积的坚硬钙积层,其对土壤水分向下运动起到一定的阻碍作用,易于壤中流的形成,从而影响水分的分布。尽管土壤水分沿坡面上下波动,单一土地利用结构的坡面样带仍保持较低的土壤水分变异系数,干湿条件下 A 列土壤水分变异系数分别为 16.6% 和 9.2%,B 列土壤水分变异系数分别为 15.0% 和 10.2%(表 2)。在草地-农地-草地的土地利用结构中(C 列),土壤水分从坡顶部到坡底部呈现明显的低-高-低的分布趋势,而草地-农地的土地利用结构中(D 列),土壤含水率表现出沿坡长增加而直线增加(图 2)。坡面土地利用方式的多元化明显地增加了土壤水分的变异系数。干湿条件下样带 C 列的土壤水分变异系数分别为 37.1% 和 14.8%,而 D 列的土壤水分变异系数分别为 35.5% 和 15.3%(表 2)。土地利用结构成为本研究坡面控制土壤水分变异最关键的因素之一。

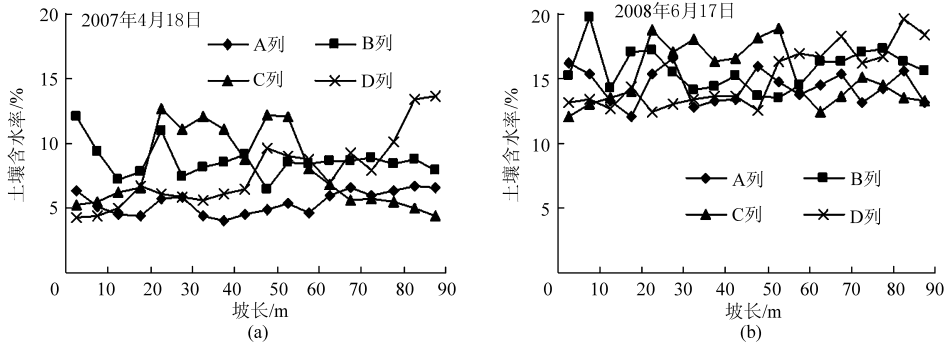


图2 各列土壤水分(0~60 cm)沿坡长分布

Fig. 2 Distribution of soil water content (0~60 cm) along slope for 4 sampling columns

表2 各列土壤水分(0~60 cm)的描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics of soil water content (0~60 cm) for 4 sampling columns

测定日期	结构类型	样本数	平均值/%	标准差	标准误差	变异系数/%	95%的置信区间/%
2007年4月18日	A	18	5.44	0.90	0.21	16.6	4.99~5.89
	B	18	8.61	1.29	0.30	15.0	7.97~9.26
	C	18	8.04	2.98	0.70	37.1	6.56~9.53
	D	18	7.75	2.75	0.65	35.5	6.38~9.12
2008年6月17日	A	18	14.38	1.32	0.31	9.2	13.73~15.04
	B	18	15.75	1.60	0.38	10.2	14.96~16.55
	C	18	15.18	2.24	0.53	14.8	14.07~16.30
	D	18	15.10	2.31	0.54	15.3	13.95~16.25

### 2.3 土壤含水率的 Moran's I 系数分析

计算土壤含水率实测值的自相关函数,并按照其所对应的滞后距离  $h$  绘制成自相关函数图(图3)。从图3可以看出,干湿条件下0~60 cm 土层平均含水率空间自相关具有相似的变化趋势。滞后距较小的点对呈显著的空间自相关,湿润条件土壤水分的正相关程度略低于干旱条件下土壤水分的相关程度。随着滞后距离的增大,自相关程度逐渐减小,当滞后距离增加到16 m左右,自相关系数在零附近摆动,将此正空间自相关的距离称为最大自相关距,大致反映了性质相似斑块的平均半径。土壤水分自相关图的这种变化趋势说明干湿条件下0~60 cm 平均土壤水分具有一定的空间结构,且呈较简单的斑块状分布,这与试验地土地利用结构情况相一致。

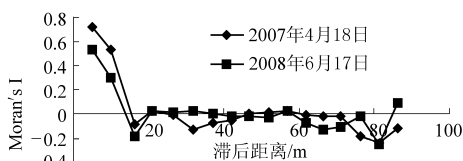


图3 土壤水分(0~60 cm)空间自相关图

Fig. 3 Spatial correlogram of soil water content (0~60 cm)

### 2.4 土壤含水率的变异函数分析

图4是干湿条件下0~60 cm 土层平均含水率的半变异函数图,同时表3给出了其相应的半变异函数理论模型的相关参数及分维数。干湿条件下0~60 cm 土层平均含水率的试验半变异函数值,经理论模型的最优拟合发现干旱条件下最佳拟合模型为高斯模型,湿润条件下最佳拟合模型为球状模型,理论半变异函数与试验半变异函数拟合较好(图4),它们的决定系数分别为0.93和0.85,经  $F$  检验达到极显著水平(表3),说明理论模型较好地反映了两次测定土壤水分的空间结构特征。

干湿条件下0~60 cm 土层平均含水率的块金值较小,均为0.11(表3),表明由试验误差和小于试验取样尺度(本试验最小取样尺度为5 m)引起的土壤水分变异较小,若增加取样密度并不能大幅度

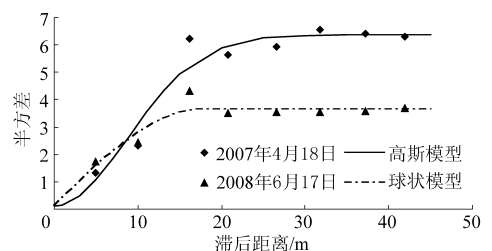


图4 土壤含水率(0~60 cm)的半方差

Fig. 4 Semi-variograms of soil water content (0~60 cm)

表 3 0~60 cm 土壤水分变异函数理论模型的相关参数及分维数

Tab.3 Best-fitted semi-variogram models of 0~60 cm soil water content, corresponding parameters and fractal dimensions

测定日期	土层深度/cm	理论型	块金值	基台值	(块金值/基台值)/%	变程/m	$R^2$	$F$	分维数
2007 年 4 月 18 日	0~5	球状	1.207	3.55	34.03	18.2	0.62	4.096	1.912
	5~10	高斯	1.23	7.22	17.03	21.0	0.95	45.58**	1.733
	10~20	高斯	1.26	8.51	14.81	26.3	0.95	48.52**	1.66
	20~30	高斯	0.50	7.82	6.39	21.2	0.95	42.95**	1.661
	30~40	高斯	0.52	8.86	5.87	20.4	0.92	28.36**	1.671
	40~50	高斯	0.43	10.18	4.22	20.4	0.92	29.97**	1.66
	50~60	高斯	0.70	10.49	6.67	21.2	0.90	21.31**	1.67
	0~60	高斯	0.11	6.36	1.73	21.4	0.93	34.81**	1.616
2008 年 6 月 17 日	0~5	高斯	2.11	4.27	49.46	27.7	0.94	40.60**	1.845
	5~10	高斯	0.02	5.78	0.35	7.2	0.84	13.13**	1.949
	10~20	球状	0.04	8.39	0.48	9.0	0.70	5.81*	1.937
	20~30	球状	0.01	6.54	0.15	10.0	0.71	6.21*	1.948
	30~40	球状	0.01	10.39	0.10	20.7	0.88	17.50**	1.819
	40~50	高斯	0.01	19.62	0.05	21.0	0.84	12.65**	1.568
	50~60	高斯	0.01	18.27	0.05	19.1	0.80	9.70**	1.622
	0~60	球状	0.11	3.664	3.00	17.7	0.85	14.06**	1.831

增加土壤水分的空间结构信息,这与经典统计分析下的最小取样数提供的信息一致。基台值在整体上表现出干旱条件下比湿润条件下大,这与张继光等<sup>[4]</sup>在喀斯特地区研究的结果一致。已有的研究结果表明,黄土高原地区影响土壤水分分布的因素中,除降雨外,土地利用方式和利用结构起到了主要控制作用<sup>[5]</sup>。土地利用方式通过影响降雨入渗和水分的蒸散发等过程,而土地利用结构主要通过影响径流侵蚀等过程影响土壤水分分布<sup>[5]</sup>,从而控制局地土壤水分变异。研究区土壤水分差异较大的农地和草地镶嵌分布,特别是样带 C 列和 D 列上土地利用方式的多元组合,控制着整个坡面土壤水分的空间异质性,使整个坡面系统内的总变异即基台值较高。在湿润条件下,土壤水分空间分布格局受地形、土壤物理性质如土壤容重和土壤导水率等控制作用较大,而土地利用的影响作用较弱,因此 2008 年 6 月 17 日测定前的 70 mm 降雨过程显然对 0~60 cm 土层水分变异起到了一定的平滑作用,使得湿润条件下土壤水分的变异程度较干旱条件有所降低(表 2)。块金值与基台值之比表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比,反映了土壤属性的空间依赖性。干湿条件下 0~60 cm 土层平均水分含量的块金/基台比值分别为 1.73% 和 3.00%,均小于 25%,意味着土壤水分在研究尺度上具有强烈的空间自相关格局,农地和草地镶嵌利用结构形成的坡面土壤水分结构性变异成为整

个研究坡面土壤水分总变异的主要组成部分,这也体现在较高的分维数上(表 3)。变程表明研究因子空间自相关范围的大小,变程以内的空间变量具有空间自相关或空间依赖性,反之则没有。本文 0~60 cm 土层平均水分的变程分别为 21.4 m 和 17.7 m。因此,在研究坡面内混合的土地利用结构尽管会改变局部地段土壤水分空间分布,但研究深度的平均土壤水分仍具有一定的空间连续性。

剖面各层土壤水分的最优理论半变异函数模型主要为球状模型和高斯模型,且其模型决定系数变化在 0.62~0.95 之间,经  $F$  检验,除干旱时表层 5 cm 外,其余均达到了显著( $p < 0.05$ )和极显著( $p < 0.01$ )水平,说明理论模型的拟合是可接受的(表 3)。干湿条件下土壤水分的块金值随土壤深度的增加而降低,基台值随土壤深度增加而增加,表现出明显的系统变化。随着土壤深度的增加,土地利用中不同植物根系分布的差异对土壤水分的影响增大,导致土壤水分的变异进一步增加,故基台值随土壤深度增加。土壤各层中除表层 5 cm 表现出土壤水分的中等空间自相关性,其余各层土壤水分都具有强烈的空间自相关性。变程随土壤深度增加呈波动变化趋势,其变化幅度干旱时为 20.4~26.3 m,湿润时为 7.2~27.7 m,后者变化幅度差异超过 3 倍,说明影响剖面土壤水分格局的过程在不同水分条件及不同深度下是不同的。

## 2.5 土壤含水率的克里格局部插值估计

为了更直观地反映土壤水分的空间分布特征,利用 Kriging 方法绘制了 0~60 cm 平均土壤水分的等值线图。等值线图的绘制在 Surfer 软件中完成, Kriging 各参数的设置参照表 3 的半变异函数模型参数,插值结果如图 5 所示。干湿条件下研究区域 C 列和 D 列坡面土壤含水率分布格局明显比 A 列和 B 列坡面土壤含水率分布复杂,即土壤水分呈现明显的斑块状分布,含水率高低差异明显。土地利用类型的不同是造成土壤水分分布格局差异的主要原因。由于不同植被类型间土壤蒸发的差异和土壤表面物理特性的差异<sup>[1]</sup>,农地土壤含水率显著地高于草地土壤含水率。整个坡面高土壤含水率(干旱时大于 10%,湿润时大于 17%)区主要集中在坡面中部农地利用方式上,而在其周边分布的草地保持着相对较低的土壤含水率。干旱条件下(2007 年 4 月 18 日),由土地利用方式不同控制形成的土壤含水率高、低斑块镶嵌分布格局明显,土壤水分的空间变异大,最大含水率与最小含水率相差 10% 左右。湿润条件下(2008 年 6 月 17 日)整个坡面最大含水率与最小含水率相差 8% 左右,坡面中部农地高含水率斑块与周边草地低含水率斑块差异缩小,但相间分布趋势仍较明显,且在相同的土地利用斑块内形成了较多的含水率高低的细小斑块镶嵌分布,这种细小斑块的存在主要是由于研究坡面微地形和土壤属性如土壤容重、土壤导水率和钙积层分布等空间差异控制形成的。这也就表明,在较湿润条件下,降水过程对由于植被利用控制形成的土壤含水率斑块差异起到了一定的平滑作用,土壤水分的空间分布格局受地形、土壤特性空间差异的控制作用增强<sup>[1,5]</sup>。

黄土高原地区的产流机制为超渗产流,不同含水率的斑块具有不同的雨水入渗能力<sup>[5]</sup>,随着土壤初始含水率的增加,土壤入渗率降低,只有降雨强度超过了水文单元的土壤水分入渗能力,该斑块才能产生径流。研究区域农草混合利用坡面土壤水分的斑块镶嵌结构,决定了在一定的降雨条件下不同土地利用方式斑块产生径流的初始时间具有差异性。遇到降雨时,径流产生区和非产流区镶嵌分布,导致径流过程的不连续性,当初始含水率较高的部分斑块形成径流时,其周围较低初始含水率的斑块可以拦截径流就地入渗。只有当降雨强度超过了所有斑块的入渗能力,整个研究坡面才能形成径流<sup>[1]</sup>。因此,基于以上分析,从径流侵蚀的控制角度出发,提出了两条土地利用管理策略。第一,通过土地利用的合理配置,提高土壤的空间变异性,从而形成水文

单元镶嵌分布的径流侵蚀自我调控系统。通过土地利用方式的配置形成混合的土地利用结构来控制生态过程(土壤水分的存储、养分流失等),将水土保持寓于土地利用之中,对研究区域的侵蚀控制和开发利用具有重要的意义。第二,通过农业措施(如合理耕作、施肥等改善土壤结构性)提高镶嵌结构下各斑块的土壤水分入渗能力,从而提高整个流域产流的土壤水分入渗能力阈值。

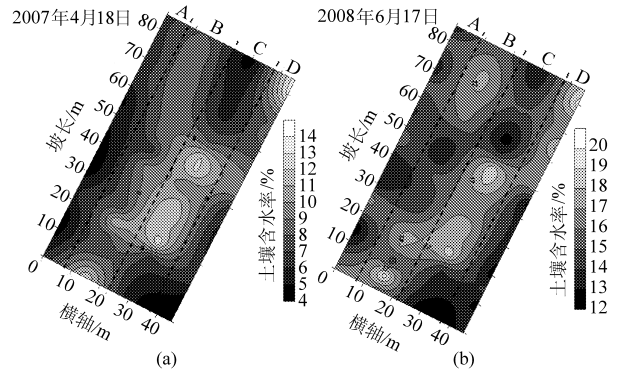


图 5 土壤含水率(0~60 cm)的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the soil water content (0~60 cm)

## 3 结论

(1) 在黄土丘陵区特定农草混合利用坡面下,土壤水分呈中等变异,且强降雨可以明显地平滑土壤水分的空间差异。根据土壤水分变异系数确定的合理采样数随时间和土层深度发生与变异系数相同规律的变化,这在获取某些水文和土壤物理模型参数时应该注意。坡面土地利用方式的多元化增加了土壤水分的变异系数,土地利用结构变化成为导致土壤水分变异的最关键因素之一。

(2) 地统计分析结果表明,农草混合利用坡面土壤水分具有明显的空间结构。干旱条件较湿润条件下 0~60 cm 土层平均水分保持较高的基台值和变程,而块金/基台比值相对较低,且它们随土壤剖面分布差异明显,进一步说明了降雨等气候条件导致平均含水率的不同能改变土壤水分的变异程度及分布格局,在水分的空间变异研究中,应根据其平均含水率采取不同的取样设计。

(3) Kriging 插值结果显示,土壤水分呈现明显的斑块状分布,与坡面的混合土地利用结构一致。在黄土高原地区,浅层土壤水分空间变异及其分布格局主要受地形、降雨和土地利用类型及结构等因素的综合影响。通过土地利用方式的配置形成混合的土地利用结构来控制生态过程(土壤水分的存储、养分流失等),将水土保持寓于土地利用之中,对研究区域侵蚀控制和开发利用具有参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 She Dongli, Shao Ming'an, Timm Luis Carlos, et al. Impacts of land use pattern on soil water content variability in the Loess Plateau of China [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 2009b, DOI: 10.1080/09064710903049334.
- 2 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 74~81.  
Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 74~81. (in Chinese)
- 3 Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, et al. Geostatistical analysis of soil moisture variability on Da Nangou catchment of the loess plateau, China [J]. *Environmental Geology*, 2001, 41(1~2): 113~120.
- 4 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.  
Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial variability of surface soil moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2277~2282. (in Chinese)
- 5 Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, 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.

~~~~~

(上接第 56 页)

## 参 考 文 献

- 1 邹建军, 曾爱军, 何雄奎, 等. 果园自动对靶喷雾机红外探测控制系统的研制[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 129~132.  
Zou Jianjun, Zeng Aijun, He Xiongkui, et al. Research and development of infrared detection system for automatic target sprayer used in orchard[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(1): 129~132. (in Chinese)
- 2 江月松. 光电技术与实验[M]. 1版. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- 3 陈永甫. 红外辐射红外器件与典型应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- 4 陈永甫. 红外探测与控制电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- 5 赵负图. 光电检测控制电路手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 6 Molto E, Martin B, Gutierrez A. Design and testing of an automatic machine for spraying at a constant distance from the tree canopy[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(4): 379~384.
- 7 Molto E, Martin B, Gutierrez A. Pesticide loss reduction automatic spraying on globular tree[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(1): 35~41.
- 8 Critten D L. Fractal dimension relationships and values associated with certain plant canopies[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 67(1): 61~72.
- 9 Tian Lei, Slaughter D C. Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 21(3): 153~168.