

黄土区退耕草地小尺度土壤水分空间异质性

刘丙霞^{1,2}, 邵明安^{1,3†}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌;
2. 中国科学院研究生院, 100039, 北京; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101, 北京)

摘要 通过在黄土高原水蚀风蚀交错带选取3块不同年限退耕草地, 进行高密度、高频度样带采样, 研究分析在表层土壤干旱和湿润状况下, 小尺度表层土壤含水率的空间异质性, 并分析改变采样间距对土壤含水率空间异质性的影响。结果表明: 小尺度表层土壤水分空间异质性为12 a退耕草地 > 20 a退耕草地 > 5 a退耕草地; 空间变异强度表现为干旱时为中等变异 > 湿润时为弱变异; 表层土壤水分方差与含水率均值呈正相关, 土壤水分方差随含水率均值增大而增大; 表层土壤水分空间连续性为12 a退耕草地 > 20 a退耕草地 > 5 a退耕草地, 且与表层土壤含水率呈负相关; 小尺度下改变采样间距, 在土壤干旱和湿润时均不改变3块退耕草地表层土壤水分空间变异程度。

关键词 小尺度; 退耕草地; 土壤含水率; 空间异质性; 水蚀风蚀交错带

Soil water content heterogeneity at small-scale on degraded grasslands on Loess Plateau

Liu Bingxia^{1,2}, Shao Ming'an^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing;
3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing; China)

Abstract In order to explore the heterogeneity of topsoil water content (SM) of regressed grasslands at small-scale, three regressed grasslands in water-wind erosion crisscross region on Loess Plateau were selected. By using high sampling-density and high frequency sampling methods at three sampling transects, we explored the heterogeneity of topsoil water content when the surface soil was in dry and moist conditions and different sampling spaces at small-scale. Results showed that the heterogeneity of topsoil water content of different regressed grasslands followed a sequence of 12 a > 20 a > 5 a and it presented medium variation when topsoil was dry. Topsoil water content was positively correlated with its variance value, that is the variance of SM increased with SM increase. Spatial continuity of SM followed a sequence of 12 a regressed grassland > 20 a regressed grassland > 5 a regressed grassland and it was negatively correlated with topsoil water content. At different sampling spaces at small-scale, the variation intensity of topsoil water content under different regressed grasslands had no change whenever the topsoil was dry or moist. This information may provide scientific proofs for water reasonable utilization and vegetation restoration on the Loess Plateau.

Key words small-scale; regressed grassland; soil water content; spatial variability; water-wind erosion crisscross region

收稿日期: 2012-02-09 修回日期: 2012-05-12

项目名称: 国家自然科学基金项目“土壤水分植被承载力模拟研究”(E090103); 教育部创新团队项目“黄土高原流域生态系统中水土迁移机制及其调控机理”(IRT0749)

第一作者简介: 刘丙霞(1986—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤物理。E-mail: liubingxia2008@126.com

† 责任作者简介: 邵明安(1956—), 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤物理、生态水文。E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

土壤水分是黄土高原植被生长、生态环境建设及植被恢复建设的主要限制因子,表层土壤水分在SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum) 水文过程中起关键作用。受自然因素、土壤特性、地形因素、植被因素和农业生产活动等直接或间接的影响,土壤水分在时空上的分布常常很不均匀(表层土壤水分更为明显),其变化尺度从几厘米到上百米,表现出高度的时空异质性。土壤水分时空异质性的存在对土壤侵蚀、溶质迁移和土壤-大气之间相互作用等水文学过程以及土壤形成过程有较大影响^[1]。20世纪70年代以来,土壤水分时空变异性研究得到了较快发展^[2-6]。土壤水分空间变异的相关研究^[7-9]表明,土壤水分在大多数田间尺度上都为中等或弱变异,但相关距离依研究区域和尺度的不同而差异较大(从几米到几百米)。胡伟等^[10]对黄土高原水蚀风蚀交错带60 m×60 m的坡地进行了相关研究,发现随着采样尺度在一定范围内的增大,土壤水分变异的特征参数,如变异系数、相关距离和Moran's I指数都不同程度地增大。目前对土壤水分空间异质性的研究多基于田间等较大尺度,小尺度尤其在采样间距<1 m以下的土壤水分空间异质性国内还鲜有研究。一般认为,充分小的采样间隔可以代表土壤属性真实的空间变异特征,而随着采样间隔的增大,小于取样尺度的空间变异规律可能将被掩盖,使得样本数据的变异函数模型与真实结构出现偏差。鉴于此,笔者在黄土高原水蚀风蚀交错带的神木侵蚀与环境实验站六道沟流域内,选择3块不同年限的退耕草地并沿坡长在一维方向上进行高密度(间隔25 cm)、高频度(每3~5 d测定1次)采样,研究不同年限退耕草地小尺度下表层土壤水分随土壤干、湿状况的空间变异规律及不同采样间距下的空间异质性,以期深化对小尺度表层土壤水分空间异质性的理解,为生态环境建设与恢复提供精准信息。

1 研究区概况

研究区位于黄土高原水蚀风蚀交错带北部、陕西省神木县城西14 km处神木侵蚀与环境实验站的六道沟小流域内,E110°26',N38°49',海拔1 094.0~1 273.9 m,北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于典型的半干旱地区,流域面积6.9 km²。该区多年平均降水量437.4 mm,年内、年际变化大。7—8月份降水量最多,约占全年降水量的50%。该区属于中温带半干旱气候区,年均气温8.4℃,月平均最低温-9.7℃(1月),月平均最高温23.7℃(7月),≥10

℃年积温3 232℃,无霜期169 d;盛行风向为西北,年平均风速2.2 m/s。该区既是黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,又为典型的生态环境脆弱区。该区属于森林草原生物气候带,但是由于人为活动强烈,天然植被多已遭到严重破坏,残存的部分天然草场也多由人工草地退化演替而来。该区地貌类型主要为片沙覆盖的黄土丘陵,主要土壤类型有绵沙土、硬黄土、红土、风沙土及坝地淤土。该区农田自然弃耕地,退耕初期首先出现的是猪毛菜(*Sal-sola arbuscula*)、苦卖菜(*Lactuca tatarica*)等先锋植物群落,3年左右演替为苦卖菜、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)等群落,10年左右演替为长芒草(*Stipa bungeana*)伴生紫云英(*Astragalus sinicus*)或达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)或草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)等群落,之后向该区顶级群落长芒草演替^[11]。

2 研究方法

2.1 样点布置及测量方法

在研究区选取3块坡向一致,坡长、坡度、海拔相近,退耕年限分别为20 a、12 a及5 a的退耕还草坡地,退耕方式为自然修复,退耕前均为农地,现在主要植被分别为长芒草、长芒草与紫云英、茵陈蒿。分别在3块退耕草地中部典型代表区域选取一条长25 m样带,每25 cm布设1点,每个样带101个点。采用经典烘干法(105℃)测定表层0~10 cm土壤质量含水率,每隔3~5 d测定1次,每次采样用2 h左右。在表层土壤干旱和降雨后湿润期各测定5次,共测10次,测定时间为2010年7—8月。饱和导水率和机械组成按1 m间距取样测定。用环刀法(环刀体积为100 cm³)测定表层土壤密度,然后与质量含水率相乘得到土壤体积含水率;采用定水头法测定饱和导水率,计算时转化为10℃下饱和导水率;土样风干过筛后用MaterSizer2000激光粒度分析仪测定土壤机械组成。

2.2 改变采样间距“再采样”

对原有的数据依次按照50、75、100、125 cm间距进行“再采样”,在每种间距下使所有的原测定数据都取到,计算每个采样样本的变异参数,相同间距下的样本变异结果取平均值,该平均值作为该采样间距尺度下的变异结果^[10]。

2.3 数据处理方法

原数据和所有“再采样”数据分别用经典统计学和地统计学方法分析^[7-10]。利用Excel、

SPSS16.0、GS+7.0 软件对数据进行处理。

3 结果与分析

3.1 退耕草地表层土壤物理特性

表 1 为 3 块退耕草地土壤物理性质(密度、饱和导水率及机械组成)统计值。可知,农耕地自然退耕后,退耕年限增加,表层机械组成差异不明显,12 a 退耕草地的粉粒和黏粒含量最大;退耕年限增加,3 块退耕草地表层土壤密度均值增大,即密度由小到大顺序为 5 a < 12 a < 20 a; 饱和导水率随退耕时间增加而减小,即 5 a > 12 a > 20 a。这可能是由于研究区土壤疏松且结构性较差,退耕前人为耕作管理使表层土壤疏松多孔,质地均一;另一方面,退耕植被生长后,由于放牧或人为踩踏及固沙固土能力增强,使一些风沙土被截留在表层,使表层土壤紧实,密度增大,饱和导水率减小。

表 1 退耕草地表层土壤物理性质

退耕草地	密度/(g·cm ⁻³)		饱和导水率/(cm·s ⁻¹)		土壤机械组成/%		
	均值	标准差	均值	标准差	砂粒	粉粒	黏粒
5 a	1.22	0.86	0.56	0.25	44.35	42.73	12.92
12 a	1.25	0.88	0.43	0.17	38.50	46.41	15.09
20 a	1.36	0.79	0.36	0.22	45.89	41.29	12.82

3.2 不同年限退耕草地的表层土壤水分异质性

3.2.1 小尺度下表层土壤水分方差与其体积含水率关系 方差(或标准差)描述变量的总体变异程度,是绝对变异,而变异系数表示的是变量相对变异

性,是相对变量均值的变化程度,消除了量纲,因此,许多研究注重方差(或标准差)表示出的总的变异性^[12-14]。

图 1 为 3 块退耕草地表层土壤水分方差(y)与其含水率均值(x)的关系曲线。可见,对于 5 a、12 a 和 20 a 退耕草地,用幂函数对土壤水分方差与其含水率均值关系拟合效果最佳。表层土壤水分方差与其含水率均值呈正相关,即土壤水分方差随着表层含水率增加而增大,这与 Hu Wei 等^[12]的研究结果相一致。而 Pan Feifei 等^[13]进行模拟研究后认为,土壤水分方差与含水率均值间关系不是单调正相关或负相关关系,因此,他们研究了在理想化状况下,即只考虑土壤质地异质性的影响、气温为 20 °C 时,土壤含水率均值存在一个阈值,当土壤含水率均值低于阈值时,方差随着土壤含水率的增大而增大,而土壤含水率均值大于阈值时,方差随着土壤含水率的增大而减小。笔者研究中的土壤含水率范围值低于阈值,所以土壤水分方差表现为随着土壤含水率均值增大而增大的趋势。研究表明,在测定的土壤含水率范围内,3 块退耕草地随着表层土壤含水率的增加,各样点间土壤水分绝对差异增大。这可能是由于土壤含水率较大时,土壤水分变化受土壤基本性质(土壤质地、机械组成和结构等)的影响减小而受土壤非内部因素(蒸发、温度、微地形等)影响增大,使土壤表层水分方差受土壤基本性质影响减小^[14-15]。这也表明在土壤含水率较低时,采样能更加准确反映由于土壤基本性质影响所产生的土壤水分空间异质性。

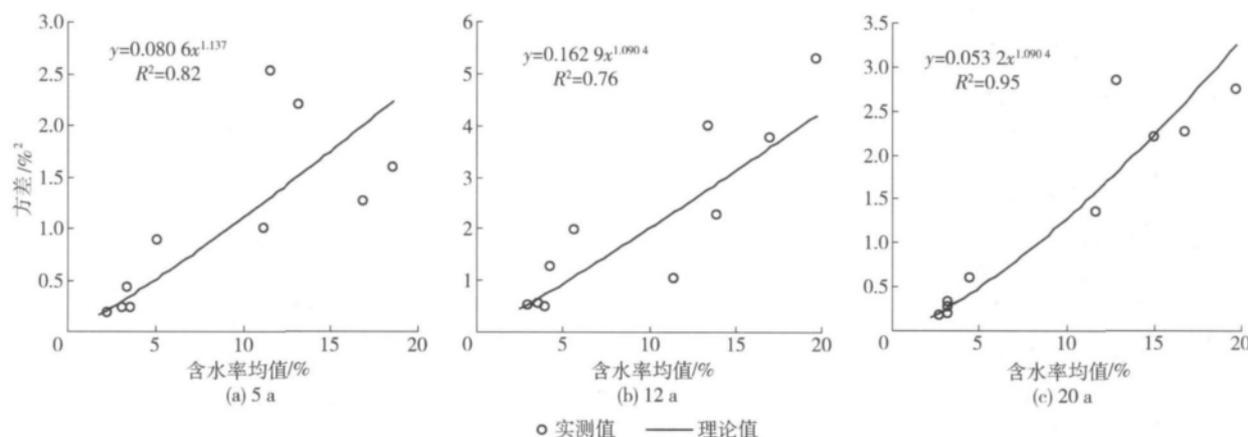


图 1 退耕草地表层土壤水分方差与其含水率均值的关系

Fig. 1 Relationship between average topsoil water content and variances of regressed grasslands

3.2.2 表层土壤水分空间变异性的经典统计分析 根据 Nielsen 划分标准^[16],按照变异系数 C_v 值大

小,可将土壤性质变异强度分为强变异($C_v \geq 100\%$)、中等变异($10\% < C_v < 100\%$)和弱变异

($C_v \leq 10\%$) 3类。由表2可见,土壤含水率较低(干旱)时,5 a、12 a和20 a退耕草地表层水分的 C_v 均值分别为11.1%、20.0%和12.5%,为中等空间变异,而含水率较高(湿润)时, C_v 均值分别为6.0%、8.5%和7.6%,属于弱空间变异。表明表层土壤水分空间变异强度在土壤干旱时大于湿润时。这主要由于土壤湿润时,降水量大于蒸散量,地形、坡位、微地貌等非土壤内部因素决定了水分分布;而土壤相对干旱时,蒸散量大于降水量,土壤水分状况主要由土壤的物理特性和植被等因素控制^[15]。由此可见,在土壤相对干旱时取样比湿润时取样更能准确地反映土壤本身特性所产生的土壤水分空间异质性。

3块退耕草地的 C_v 均值、标准差和方差等由大到小的顺序均为12 a > 20 a > 5 a,表明12 a退耕草地表层土壤水分空间变异性最大。这可能是由于12 a退耕草地植被演替为长芒草并伴生紫云英,生长茂盛且呈斑块状,使得土壤颗粒分布较随机,形成微地形,从而使表层土壤水分变异最大;20 a退耕草地植被演替达到了顶级群落,相对稳定,长芒草生长较均一且主要利用表层土壤水分,从而使土壤含水率变幅相对较小,统计值较小;5 a退耕草地,由于退耕前的耕作,表层土壤疏松,结构较均一,入渗快蒸发也快,处于退耕演替初期,土壤物理性质改良不明显,从而使表层土壤含水率小,其空间异质性也小^[11,17]。

表2 表层土壤水分统计特征值

Tab.2 Statistical characteristic values of topsoil moisture

退耕草地	干湿状况	样本数	均值/%	标准差	方差	C_v 均值/%	偏度	峰度	分布类型
5 a	干旱	101	3.52	0.39	0.15	11.1	0.48	0.41	N
12 a		101	4.10	0.82	0.67	20.0	-0.01	-0.80	N
20 a		101	3.37	0.42	0.18	12.5	0.39	-0.63	N
5 a	湿润	101	14.28	0.90	0.81	6.0	0.50	0.36	N
12 a		101	15.11	1.38	1.91	8.5	0.37	-0.14	N
20 a		101	15.24	1.23	1.50	7.6	0.02	-0.14	N

注: N表示K-S检验实验数据分布类型服从正态分布。

3.2.3 表层土壤水分空间异质性的地统计参数分析 半方差函数模型中地统计参数包括块金值(C_0)、结构方差(C_1)、基台值($C_0 + C_1$)、变程(α),空间异质比 $C_0 / (C_0 + C_1)$ 表示土壤水分的空间依赖性,其值在0~1之间^[18]。根据Cambardella划分标准^[18], $C_0 / (C_0 + C_1) \leq 0.25$ 表示强空间依赖性, $C_0 / (C_0 + C_1) \geq 0.75$ 表示弱空间依赖性, $0.25 < C_0 / (C_0 + C_1) < 0.75$ 表示中等空间依赖性。由表3可知:土壤干旱时,20 a退耕草地空间异质比为0.42,为中等依赖性,5 a、12 a退耕草地空间异质比分别为0.06和0.13,具有强空间依赖性;土壤湿润时,3块

退耕草地空间异质比分别为0.50、0.44和0.49,均表现为中等空间依赖性。3块退耕草地在土壤干旱和湿润时块金值 C_0 均大于0,说明相邻2个数据间存在一定程度的变异,即存在正块金效应。3块退耕草地土壤水分变异函数的变程 α 差异较大,5 a退耕草地变程 α 最小(干旱时1.08 m,湿润时4.41 m),说明其表层土壤水分空间连续性最差,而12 a、20 a退耕草地变程较大,说明表层土壤水分空间连续性较好,可适当增大采样间距。可知,3块退耕草地的土壤水分空间连续性为12 a退耕草地 > 20 a退耕草地 > 5 a退耕草地。

表3 表层土壤含水率空间变异特征参数

Tab.3 Characteristic parameters for spatial variability of topsoil water content

退耕草地	干湿状况	块金值	基台值	变程/m	空间异质比	决定系数	RSS	模型
5 a	干旱	0.01	0.16	1.08	0.06	0.53	9.57×10^{-4}	球状
12 a		0.21	1.65	19.16	0.13	0.97	0.04	高斯
20 a		0.08	0.20	6.30	0.42	0.75	3.64×10^{-3}	球状
5 a	湿润	0.46	0.91	4.41	0.50	0.76	0.02	指数
12 a		1.31	2.97	14.88	0.44	0.95	0.13	高斯
20 a		0.66	1.35	6.84	0.49	0.82	0.06	指数

3.3 采样间距对表层土壤水分空间变异性的影响

表 4 为不同采样间距下表层土壤水分统计特征值。可知,土壤干旱时,改变采样间距(25、50、100、125 cm),3 块退耕草地表层土壤水分的变异系数 C_v 值变化无规律,变化范围分别为 11.1% ~ 12.3% (5 a)、20.0% ~ 21.8% (12 a) 和 11.6% ~ 13.7% (20 a),均不改变其空间变异程度。对不同采样间距下表层含水率进行方差分析, Sig. 分别为 0.54 (5 a)、0.99 (12 a) 和 0.33 (20 a),均大于 0.05,即不同采样间距下表层含水率均值无显著差异。标准差也无规律变化且变化很小。土壤湿润时,3 块退耕草地土

壤水分的变异系数、标准差、均值随采样间距增大也均无规律地变化,且变幅很小。因此,小尺度下改变采样间距对表层土壤水分的变异系数、标准差、均值等统计特征值的影响很小,不改变土壤水分的空间变异强度,可以认为,小尺度改变采样间距对土壤表层水分的空间变异性影响可忽略,这与胡伟等^[10]在较大尺度上的研究结果一致。由此可见,在一定的研究区域内,适当增大采样间距能简便、准确地获得土壤水分的真实空间变异性。如在本研究中,采样间距为 100 cm 或更大时,可以减少采样点并获得可靠、真实的表层土壤水分统计特征值。

表 4 不同采样间距下表层土壤水分统计特征值

Tab. 4 Statistical characteristic values of topsoil moisture at different sampling spaces

退耕草地	采样间距/cm	样本数	均值(体积)/%		标准差		C_v 值/%	
			干旱	湿润	干旱	湿润	干旱	湿润
5 a	25	101	3.52	14.28	0.39	0.86	11.1	6.0
	50	51	3.54	14.40	0.44	0.83	12.3	5.8
	100	26	3.47	14.19	0.39	0.83	11.1	5.9
	125	21	3.66	14.40	0.42	0.69	11.5	4.8
12 a	25	101	4.10	15.11	0.82	1.28	20.0	8.5
	50	51	4.07	15.08	0.83	1.35	20.3	9.0
	100	26	4.08	15.12	0.89	1.36	21.8	9.0
	125	21	4.01	15.31	0.87	1.43	21.7	9.3
20 a	25	101	3.37	15.24	0.42	1.15	12.5	7.6
	50	51	3.34	15.09	0.39	1.11	11.6	7.4
	100	26	3.28	14.95	0.39	1.28	11.8	8.6
	125	21	3.43	15.34	0.47	1.34	13.7	8.7

4 结论

1) 3 块退耕草地表层土壤水分空间异质性在土壤含水率低(干旱)时属于中等变异,含水率高(湿润)时属于弱变异;由于 3 块退耕草地退耕年限不同,其植被状况和土壤基本属性等不同,从而导致表层土壤水分空间变异强度由大到小表现为 12 a 退耕草地 > 20 a 退耕草地 > 5 a 退耕草地。

2) 在观测的表层土壤含水率范围内,表层土壤水分方差与含水率均值呈正相关,即土壤水分方差随表层含水率均值增大呈现出增大趋势。在表层土壤含水率较小时,方差受土壤基本性质影响较大,而表层土壤含水率较大时,方差受土壤非内部因素影响增大;因而,表层土壤含水率较低时采样能准确反映受土壤基本性质影响而产生的表层土壤水分空间异质性。

3) 3 块退耕草地表层土壤水分均存在正块金效应,即存在空间异质性。土壤干旱时,20 a 退耕草地为中等相关性,5 a、12 a 退耕草地表层土壤水分具有强烈的空间依赖性,而土壤湿润时,3 块退耕草地表层土壤水分均为中等空间依赖性;表层土壤水分空间连续性表现为 12 a 退耕草地 > 20 a 退耕草地 > 5 a 退耕草地。

4) 不同采样间距下,土壤干旱和湿润时,3 块退耕草地的表层土壤水分空间变异程度均不改变。因此,在一定的研究区域内,适当增大采样间距能快速、准确地反映表层土壤水分的真实空间变异性。

5 参考文献

- [1] Western A W, Zhou Senlin, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J].

- Journal of Hydrology, 2004, 286(1-4): 113-114
- [2] 吕贻忠,李保国,胡克林,等. 鄂尔多斯夏初不同地形土壤水分的空间变异[J]. 中国农业大学学报,2002,7(5): 38-43
- [3] 胡克林,李保国,陈德立,等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J]. 水科学进展, 2001,12(4): 460-465
- [4] 张淑娟,何勇,方慧. 基于GPS和GIS的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2): 39-43
- [5] 高鹭,陈素英,胡春胜,等. 喷灌条件下农田土壤水分的空间变异性研究[J]. 地理科学进展,2002,21(6): 609-614
- [6] Wilson D J, Western A W, Grayson R B, et al. Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30 cm depth, Mahurangi river catchment, New Zealand [J]. Journal of Hydrology, 2003,276(1-4): 254-274
- [7] 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
- [8] Hu Wei, Shao Ming'an, Han Fengpeng, et al. Watershed scale temporal stability of water content [J]. Geoderma, 2010,158(3-4): 181-198
- [9] 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
- [10] 胡伟,邵明安,王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报,2005,21(8): 11-16
- [11] 李裕元,邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究[J]. 应用生态学报,2005,16(12): 2321-2327
- [12] Hu Wei, Shao Ming'an. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land [J]. Geoderma, 2011,162(3-4): 260-272
- [13] Pan Feifei, Peters-Lidard C D. On the relationship between mean and variance of soil moisture fields [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008,44(1): 235-242
- [14] Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008,147(3-4): 185-191
- [15] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls [J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2897-2908
- [16] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Las Vegas: Pudoc Wageningen, 1985: 2-30
- [17] 魏兴琥,谢忠奎,段争虎. 黄土高原西部弃耕地植被恢复与土壤水分调控研究[J]. 中国沙漠,2006,26(4): 590-595
- [18] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511

(责任编辑: 宋如华)