

DOI: 10.11766/trxb201404040151

黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异 及其季节性特征*

高晓东^{1, 2} 吴普特^{1, 2} 张宝庆¹ 黄俊¹ 赵西宁^{1, 2†}

(1 西北农林科技大学水土保持研究所 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西杨凌 712100)

摘要 基于 213 个样点土壤有效水数据,从流域、坡面和沟道三个尺度分析了黄土丘陵区典型小流域土壤有效水在春、夏、秋三个季节的空间变异特征。结果表明,土壤有效水均呈较强空间变异性,其中沟道土壤有效水均值和空间变异强度(标准差和变异系数)均显著高于坡面,坡面和沟道土壤有效水正态性明显好于流域尺度。不同尺度土壤有效水空间变异程度随均值发生变化,变异系数随均值增加呈指数递减趋势。流域和坡面尺度土壤有效水与坡向呈显著正相关关系且相关系数高于其与坡度和高程,而沟道尺度与各地形因子相关关系均较弱。土壤有效水空间变异呈现明显的季节性特征,秋季土壤有效水均值最高而空间变异性最低,夏季土壤有效水均值最低但变异系数最大。流域尺度夏季土壤有效水与高程相关系数显著高于春秋两季,而坡面尺度则相反。此外,土壤有效水抽样不确定性和估算误差随样点数量增加呈非线性递减变化趋势,当样点数超过 20 个时,增加样点数量的作用有限。

关键词 黄土高原;小流域;土壤水;空间变异;季节性

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水处于土壤-植物-大气连续体(SPAC)的核心位置,一方面直接关系植被恢复和作物产量,另一方面通过改变土壤水入渗速率影响地表径流过程^[1]。然而土壤水存在较强空间异质性,且随研究尺度和季节变化而异。在空间上了解植被恢复和产汇流过程时,土壤水时空变异信息不可或缺。因此刻画土壤水时空变异特征对于了解干旱半干旱地区生态水文和土壤水文过程具有重要意义^[2]。

黄土丘陵区下垫面条件复杂,降雨季节性特征明显,是土壤水时空变异研究的热点区域^[3-5]。小流域作为一个完整的产流产沙水文单元,兼具土壤水测定便利的特征,是土壤水时空变异研究的重要尺度。该区小流域多为沟谷发育成熟的沟道流域,以沟缘线为界,可分为坡面(沟间地)和沟道(沟谷地)两大地貌类型。坡面地形相对平缓,土壤水测定较为方便,因此小流域尺度土壤水时空变异研究目前主要集中在坡面上^[3, 6-8]。沟道由于坡陡沟

深,土壤水测定困难,相关研究成果较少。但已有研究表明沟道土壤水存在较强空间异质性, van den Elsen 等^[9]以黄土丘陵区切沟为例分析了沟道土壤水分时空变异特征,发现沟顶土壤水分状况最好,沟底次之,沟坡陡崖最差。Gao 等^[10]以黄土丘陵区小流域冲沟为单元,在样带尺度上着重分析了沟道边坡土壤水时空变异特征,发现微地形显著改变沟道土壤水空间分布。胡伟^[11]进一步研究发现,沟道显著影响小流域土壤水时空变异特征,因此,研究该区小流域土壤水时空变异特征时,沟道土壤水不容忽视。然而,目前在小流域尺度上同时考虑坡面和沟道的土壤水时空变异研究较少,难以全面了解该区小流域土壤水分空间变异特征。

降雨、地形、土壤、植被等因素的非线性时空分布是引起土壤水时空变异的主要原因^[2]。地形因素对黄土丘陵区土壤水时空变异的影响受到了更多关注。胡伟等^[4]发现坡位和坡向不仅影响土壤

* 国家自然科学基金项目(31172039, 41401315)、国家科技支撑计划项目(2011BAD29B09)资助

† 通讯作者, E-mail: xiningz@aliyun.com

作者简介:高晓东(1985—),男,河南省鄆城县人,博士,助理研究员,主要从事黄土丘陵区小流域土壤水文与雨水转化过程方面的研究。E-mail: doniao1@163.com, gao_xiaodong@nwsuaf.edu.cn

收稿日期:2014-04-04;收到修改稿日期:2014-09-16

http://pedologica.issas.ac.cn

含水量,而且影响土壤水空间变异程度,其中坡上土壤含水量较坡中和坡下低,而空间变异程度较二者高。Qiu 等^[12]研究表明地形(高程、坡度和坡向)和土地利用类型均对大南沟小流域土壤平均含水量有显著影响,但前者对土壤水动态变化趋势的影响高于后者。Huang 等^[13]进一步分析土壤水影响因素的动态变化,其在安家沟小流域的研究表明,在高湿度土壤状况下,坡向和土地利用是土壤水空间分布的主要影响因素,而不同湿度状况坡面曲率、坡位、高程和坡度对土壤水空间分布的影响均较弱。然而 Gao 等^[10]在沟道尺度的研究发现在无降雨或无明显降雨期间,坡度和坡向对土壤水的影响较弱,而在显著降雨期间,二者的影响显著增强。这表明地形因素对黄土丘陵区坡面和流域尺度土壤水时空变异具有重要影响,但研究结果并不一致,而且较少研究从流域整体(同时考虑坡面和沟道)角度进行分析。

与土壤水相比,土壤有效水与植被恢复和作物生长关系更为密切,因此本文以土壤有效水为研究对象,以黄土丘陵区典型小流域为单元,在坡面和沟道进行土壤水采样,计算土壤有效水数据,从流

域、坡面和沟道三个尺度分析土壤有效水空间变异及其季节性特征,以为该区小流域尺度土壤有效水评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区园则沟小流域地处陕西省清涧县店则沟镇(37°15' N, 118°18' E),为典型的黄土丘陵区小流域。流域面积 0.58 km²,其中坡面为 0.27 km²,沟道为 0.31 km²(图 1)。本区属温带大陆性季风气候,年均温 8.6 °C,月均最低温度 -6.5 °C(1 月),月均最高温度 22.8 °C(7 月)。多年平均降水量 505 mm,其中 70%集中在 7—9 月份。小流域地形起伏较大,相对高差超过 200 m,主沟道 1 100 m,已下切至基岩,沟底土层多在 20 cm 以下。坡面坡度在 0~35°,沟道坡度在 30°~90°。流域内有多种土地利用类型,坡面上主要包括红枣林地、农地、撂荒地和草地;沟道主要为以铁杆蒿为主的稀疏草地。小流域内土壤主要为黄绵土,属于粉质壤土,具体土壤参数详见参考文献[14]。

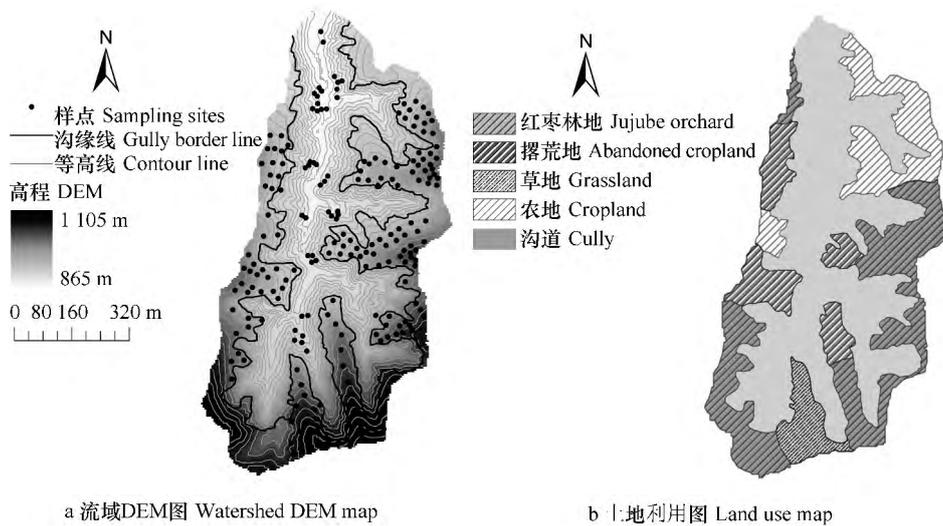


图 1 研究区土壤水样点分布(等高距为 10 m)

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study site (10 m in contour interval)

1.2 土壤水测定和土壤有效水计算

在小流域不同土地利用类型和空间位置进行样点选择和布设,但在具体样点选择上有一定随机性。其中坡面 171 个,沟道由于边坡坡度较大(30°~90°)且微地形复杂,特别是沟道边坡上部采样十分困难,因而本研究只在沟道边坡中部和下部布设样点 42 个,如图 1 所示。采用土钻(直径

28 mm)分别在 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm 土层取土样放入铝盒,然后带回实验室用烘干法(105 °C, 12 h)测定土壤质量含水量。采用枣树枝条对样点位置进行标记,在 2010 年春季(4 月 10 日—4 月 11 日)、夏季(6 月 14 日—6 月 16 日)和秋季(8 月 31 日—9 月 1 日)分别测定一次,三次采样时间的前期降雨量分别为 8.2 mm(4 月 3 日)、

<http://pedologica.issas.ac.cn>

4.8 mm(6月8日)和58.9 mm(8月18日~8月22日)。2010年生长季降雨和参考蒸散发量(ET_0)如表1所示。为了便于书写,文中0—10 cm记为10 cm,10~20 cm记为20 cm,以此类推。由于采用土钻法取样,三次样点位置略有偏离,但间距在20 cm左右,因此本文假设其对土壤水测量误差的影响忽略不计。

表1 2010年生长季不同月份降雨和参考蒸散发量
Table 1 Precipitation and reference evapotranspiration (ET_0) over the growing season in 2010

月份 Month	降雨量 Precipitation (mm)	ET_0 (mm)
4月 April	21.3	112.3
5月 May	29.7	166.7
6月 June	12.9	204.2
7月 July	27.1	178.1
8月 August	136.7	123.4
9月 September	46.3	102.4
10月 October	18.6	90.6

土壤有效水的上限和下限分别为田间持水量和凋萎湿度,但是由于黄土入渗性能强,大于田间持水量的土壤水会在降雨结束后迅速入渗,进而低于田间持水量^[14],因此本文土壤有效水将不设置上限,即土壤有效水为土壤含水量与凋萎湿度的差值,若土壤含水量低于凋萎湿度则记为0。流域、坡面和沟道土壤平均有效含水量分别为各自区域内所有样点土壤有效水的算术平均值。其中凋萎湿度测定方法如下:

在每种土地类型内,选择典型坡面,沿坡面自上而下,利用环刀(高5 cm,直径5 cm)在0~5、10~15、20~25和30~35 cm土层各取3个原状土,带回实验室分析,坡面上共计12个样点,沟道共计6个样点。采用高速离心机(日立CR22GIII型号)确定土壤水分特征曲线,然后在土壤水分特征曲线上获取-1 500 kPa水势对应的土壤含水量(质量含水量)。0~10 cm凋萎湿度采用0~5 cm凋萎湿度测定值,10~20 cm采用10~15 cm的凋萎湿度测定值,由于黄土高原20 cm以下土层凋萎湿度变异较小^[15],因此20~40 cm和40~60 cm均采用20~25 cm和30~35 cm凋萎湿度的算术平均值。一般地,土壤凋萎湿度主要受土壤颗粒组成影响,而地形、土层深度和土地利用类型均能够显著影响黏粒含量的空间分布^[16],因此对于某一土层,分别计算各土地利用类型凋萎湿度。坡面上某一土地利用

类型(4种类型)凋萎湿度为其3个样点测定值的算术平均值,沟道为6个样点算术平均值。

各样点地形参数包括坡度正切值($\tan\alpha$)、坡向余弦值($\cos\beta$)和高程数据均基于流域DEM(5 m精度)提取。

1.3 分析方法

采用Kolmogorov-Smirnov方法判断土壤有效水分布的正态性,采用 t 检验方法检验坡面与沟道土壤有效水的差异显著性,采用Pearson相关系数量化土壤有效水与地形因子相关关系。

在分析样点数量对土壤有效水影响时,假设213个样点土壤有效水能够代表流域整体,分别从不确定性和估算误差两方面进行分析:

(1) 不确定性:标准误差(标准误)为样本均值的标准差,采用标准误反映抽样引起的不确定性,其值越大,表明样本均值的不确定性越大^[17]。当样本为完全独立变量时,标准误差(S_m)可表示为:

$$S_m = \frac{S}{\sqrt{M}} \quad (1)$$

式中, s 为样本标准差, m 为样本数量。

实际上,土壤有效水是一个空间变量,在变程之内,样点间的土壤有效水具有一定的空间相关性^[18],标准误与式(1)有所差异,具体计算如下:对于某一采样时间某一土层土壤有效水,首先从总体 N (本文为213)中随机抽取样本量为 M ($1 \leq M \leq N/2$, M 为整数)的样本集,每个样本只允许抽取一次,共得到 $K = N/M$ 个独立样本集,若 K 为小数,只舍不入。然后分别计算 K 个样本集的平均值,计算其标准差(S),即为标准误。以上程序重复1 000次以降低随机抽样的影响。

(2) 估算误差:以样本偏差绝对值即总体均值与样本均值之差的绝对值表示估算误差。首先从总体 N 中随机抽取样本量为 M ($1 \leq M \leq N$, M 为整数)的样本集,计算其均值,然后计算总体均值与样本均值之差的绝对值,该估算误差的方法称之为随机组合法^[19-20]。以上程序同样重复1 000次以降低随机抽样的影响。

2 结果

2.1 描述统计分析

流域、坡面和沟道不同土层在春、夏、秋三个季节的土壤有效水统计值如表2所示。在土壤平均有效含水量(以下简称均值)方面,不同季节和土层均

表现为沟道 > 流域 > 坡面,其中沟道和坡面的差异达到显著水平($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$)。这是由于沟道样点多位于沟道边坡中下部位置,为汇流相对集中区域,水分状况较好。实际上,坡面和沟道代表的是流域的两类空间单元,其土壤有效水均值的差异,不仅是两类地形差异的原因,更是土地利用(类型、盖度、密度等)、地形(高程、坡度、坡向等)、气象因子(降雨、气温、风速等)等环境因素差异的综合反映。有效水均值就不同季节而言,不同尺度和土层均表现为秋季 > 春季 > 夏季,其中秋季和夏季的差异达到了显著水平($p < 0.01$),主要原因就是秋季的降雨量明显高于春夏两季(表 1);就不同土层而言,各尺度不同季节土壤有效水均随土层增加而增大,主要原因可能是由于太阳辐射等气象因素对土壤有效水的影响随土层增加而降低,进而减少了土壤蒸发。

在空间变异方面,不同季节和土层土壤有效水

标准差和变异系数均表现为沟道 > 流域 > 坡面,与均值分布特征相同。然而标准差和变异系数在季节性和垂直分布特征上明显不同,各尺度和土层标准差和变异系数均为秋季最低,但是标准差为春季最高,而变异系数为夏季最高;就不同土层而言,除个别季节和尺度 40 cm 土层最高外,标准差整体上随土层增加而增大,而变异系数随土层增加而降低。偏度和峰度随尺度、季节和土层变化的规律性不明显,但是流域尺度上较坡面和沟道表现出明显较高的峰度和左偏,进而对数据频率分布造成影响。正态分布检验结果表明坡面和沟道不同季节不同土层土壤有效水均符合正态分布(除坡面夏季 10 cm 外),而流域尺度上数据的正态性要弱许多,其中春季各层均符合对数正态分布,而夏季既不符合正态也不符合对数正态分布,以上分析表明土壤有效水空间变异特征呈现明显的尺度性。

表 2 流域、坡面和沟道不同季节和土层土壤有效水统计特征

Table 2 Statistics of available soil moisture in different seasons and depths at watershed, hillslope and gully scales

季节 Season	土层 Depth (cm)	统计参数(流域/坡面/沟道) Statistic parameters (watershed/hillslope/gully)						显著性 Signifi- cance
		均值 Mean (%)	标准差 SD (%)	变异系数 CV	峰度 Kurtosis (%)	偏度 Skewness (%)	正态性 Normality	
春季 Spring	10	5.19/4.82/6.70	2.47/1.85/3.80	0.48/0.38/0.57	3.77/-0.61/0.40	1.26/-0.11/0.90	LN/N/N	**
	20	6.99/6.70/8.18	2.51/1.94/3.91	0.36/0.29/0.48	2.79/-0.43/-0.01	1.22/0.21/0.88	LN/N/N	*
	40	7.72/7.30/9.43	2.93/2.16/4.62	0.38/0.30/0.49	2.85/0.33/-0.63	1.28/0.14/0.73	LN/N/N	**
	60	8.40/7.97/10.12	2.99/2.16/4.78	0.36/0.27/0.47	2.72/0.53/-0.45	1.26/0.59/0.46	LN/N/N	**
夏季 Summer	10	1.66/1.27/3.24	2.07/1.59/2.89	1.24/1.25/0.89	1.44/0.60/-0.98	1.40/1.26/0.49	NN/NN/N	**
	20	3.10/2.67/4.86	2.49/2.14/3.02	0.80/0.80/0.62	0.58/0.28/-0.30	0.90/0.82/0.36	NN/N/N	**
	40	4.28/3.67/7.02	2.86/2.06/3.91	0.67/0.57/0.56	2.95/0.18/-0.30	1.39/0.44/0.73	NN/N/N	**
	60	5.35/4.70/7.99	2.96/1.97/4.51	0.55/0.42/0.56	5.62/0.72/0.39	1.82/0.29/0.99	NN/N/N	**
秋季 Fall	10	6.06/5.77/7.23	1.91/1.46/2.88	0.32/0.25/0.40	4.94/1.15/1.82	1.14/-0.33/0.80	LN/N/N	**
	20	8.38/8.19/9.17	1.87/1.51/2.79	0.22/0.18/0.30	2.22/-0.19/0.14	1.10/0.35/0.89	N/N/N	*
	40	9.97/9.68/11.15	2.45/2.21/3.00	0.25/0.23/0.27	3.27/5.85/-0.57	0.76/0.69/0.44	LN/N/N	**
	60	10.57/10.34/11.52	2.12/1.81/2.92	0.20/0.18/0.25	1.21/0.57/-0.28	0.80/0.43/0.55	N/N/N	*

注:正态性检验中 N 表示正态分布, LN 表示对数正态分布, NN 表示既不服从正态分布也不服从对数正态分布。显著性检验对象为坡面和沟道均值,其中* 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著。Notes: In the normality test, N stands for normality, LN for log normality, NN for neither normality nor log normality. The significance test is designed for means of soil available moisture in hillslope and gully, and a single asterisk (*) denotes significance in difference at $p < 0.05$ level, and double asterisks (**) at $p < 0.01$ level

2.2 均值与空间变异参数的关系

以上分析可以看出空间变异参数变异特征与均值相似或相左,表明二者之间存在某种关联,本节将着重分析空间变异参数(标准差、变异系数、偏度和峰度)与均值之间的关系,如图 2 所示。虽然

不同尺度土壤有效水均值和标准差关系不明显,但是变异系数与均值表现出显著的负相关关系,进一步分析发现变异系数与均值的关系可以用 Famiglietti 等^[21]建议的指数关系较好地拟合(图 2b),拟合方程如下:

<http://pedologica.issas.ac.cn>

$$CV = A \exp(B \bar{\theta}) \quad (2)$$

式中, CV 为变异系数; $\bar{\theta}$ 为土壤有效水均值 (%) ; A 和 B 为拟合参数。然后根据变异系数与标准差的关系, 可得到标准差与均值的拟合方程, 如下:

$$SD = A \bar{\theta} \exp(B \bar{\theta}) \quad (3)$$

式中, SD 为标准差 (%) , 其余参数同上。拟合参数与拟合统计结果如表 3 所示, 结果显示变异系数的拟合统计结果明显好于标准差。标准差统计项中误差项 (MBE 和 $RMSE$) 虽然较低, 但是预测值和实

测值随土壤有效水均值的变化趋势差异较大。与标准差不同, 变异系数是一个相对变异指标, 图 2 显示土壤有效水相对变异程度随均值增大逐渐降低, 表明高湿度土壤将降低土壤有效水空间上的相对变异程度但对绝对变异 (标准差) 影响不显著。

偏度与均值的关系整体上呈线性负相关关系, 但是不同尺度上二者关系迥异, 而且均未呈现显著线性关系。不同尺度峰度与均值的关系无明显规律性, 这表明土壤有效含水量高低对峰度的影响不显著。

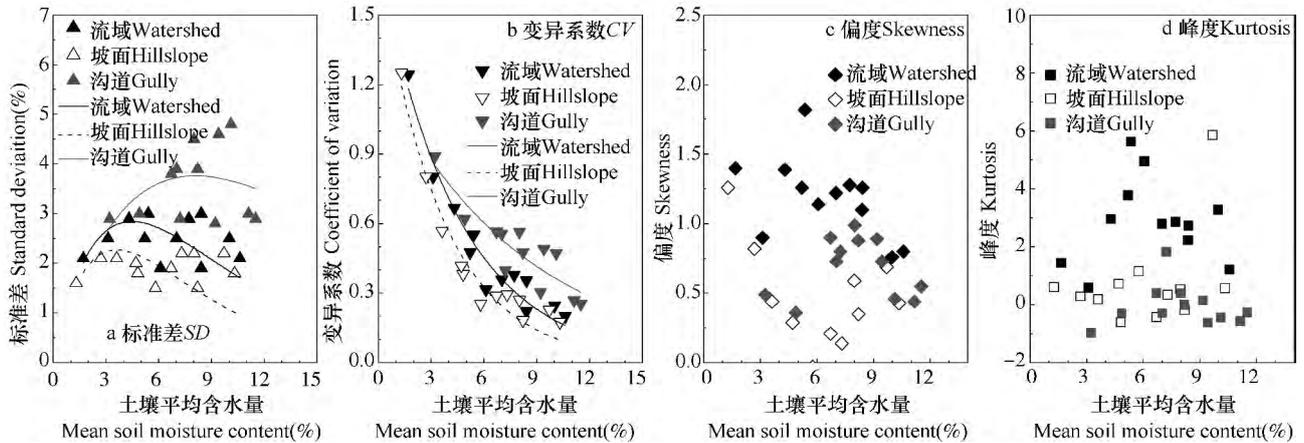


图 2 土壤平均有效含水量与空间变异参数的关系

Fig. 2 Relationship between mean soil available moisture and spatial variability parameters

表 3 拟合参数与拟合统计结果

Table 3 Fitting parameters and fitting statistics

位置 Location	样本数 Number of samples	拟合参数 Fitting parameters			标准差 Standard deviation				变异系数 Coefficient of variation		
		A	B	R ²	p	MBE	RMSE	R ²	p	MBE	RMSE
流域 Watershed	12	1.733	-0.224	0.128	0.122	0.001	0.004	0.945	<0.001	0.006	0.064
坡面 Hillslope	12	1.712	-0.277	0.022	0.537	0.002	0.005	0.947	<0.001	0.013	0.067
沟道 Gully	12	1.266	-0.124	0.193	0.109	0.000	0.007	0.782	<0.001	0.000	0.075

注: MBE : 平均偏差; $RMSE$: 均方根误差 Note: MBE : mean bias error; $RMSE$: root mean square error

2.3 样点数量对估算精度的影响

首先分析样点数量对抽样不确定性的影响, 采用相对标准误即标准误与标准差的比值反映抽样不确定性。预分析表明三个尺度研究结果相似, 这里仅以流域尺度为例进行分析。不同季节相对标准误随样点数量的变化趋势如图 3 所示。结果显示, 不同季节相对标准误随样点数增加而降低。而且尽管土壤有效水存在空间相关性, 实际变化趋势与理论曲线 ($1/\sqrt{M}$) 十分接近, 理论相对标准误略高于实际值。相对标准误随样点数增加呈明显的非线性变化趋势, 以春季 10 cm 土层为例, 当样点数

从 1 个增加到 2 个时, 相对标准误从 100% 降低到了 71%; 当样点数增加到 4 个时, 相对标准误降低到了 50%; 当样点数增加到 23 个时, 其降低到了 20%。然而, 之后随着样点数的继续增加, 相对标准误变化幅度十分平缓, 若相对标准误降低到 10%, 则需 71 个样点。这表明当抽样不确定性降低到一定程度后, 继续增加随机样点数对降低抽样不确定性的作用十分有限。不同季节和土层研究结果对比分析表明, 抽样不确定性无明显的季节性和垂直变化特征, 表明土壤 (有效) 水抽样不确定性仅是样本数量的函数, 与环境因素无明显关系。

<http://pedologica.issas.ac.cn>

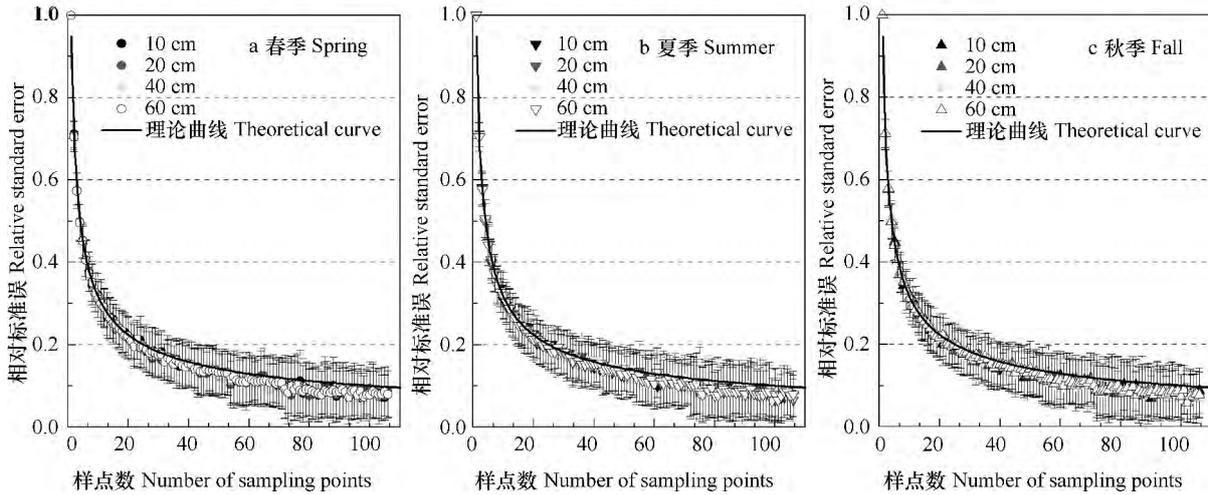


图3 相对标准误差随样点数的变化特征(误差棒为标准差)

Fig. 3 Relative standard error as a function of the number of sampling sites (error bars represent standard deviation)

然后分析样点数量对土壤有效水估算误差的影响,采用绝对偏差表示土壤有效水估算误差,以流域尺度为例分析土壤有效水绝对偏差随样点数的变化特征,如图4所示。结果表明,与抽样不确定性研究结果相似,绝对偏差随样点数增加亦呈明显的非线性递减趋势,而且估算偏差的不确定性也逐渐降低。以春季10 cm为例,当随机选取1个样点时,绝对偏差为1.86%;当样点数增加到4个时,绝对偏差下降了将近1/2,为0.97%;而当随机样点数达到20个,绝对偏差又下降了1/2左右,为0.42%,然而如果让绝对偏差在此基础上再下降1/2,随机样点数需要增加至65个。这表明当估算误

差降低到一定程度时,继续增加样点数对降低估算误差的作用也十分有限,计算效率将明显降低。与抽样不确定性研究不同,样点数对土壤有效水估算误差的影响呈现较为明显的季节性和垂直性特征。具体表现为,当样点数少于10个,秋季土壤有效水绝对偏差明显低于春季;不同季节绝对偏差随土层变化而变化,在10 cm土层最低,40 cm土层最高。但是季节和土层的影响相对微弱,尤其当样点数较多时,不同土层绝对偏差几乎重合。以上分析表明在流域内随机选取20个样点即可较为准确反映流域土壤有效水整体状况,但需注意样点较少时估算误差不确定性较大。

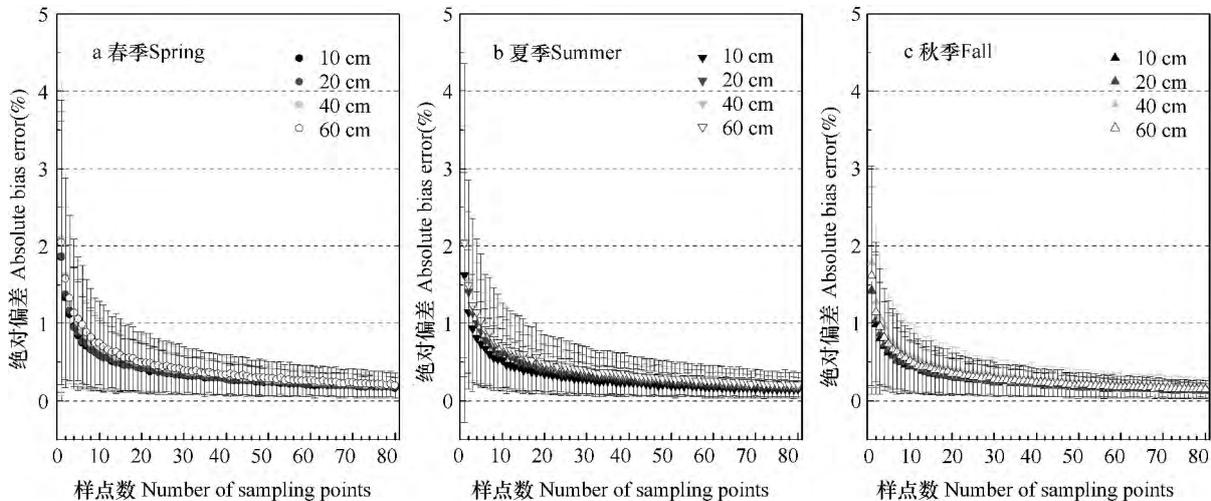


图4 绝对偏差随样点数的变化特征(误差棒为标准差)

Fig. 4 Absolute bias errors as a function of the number of sampling observations (error bars represent standard deviation)

2.4 土壤有效水空间分布与地形因子的关系

流域、坡面和沟道三个尺度不同季节和土层土壤有效水与地形因子 Pearson 相关系数如表 4 所示。总体而言, 流域尺度相关系数最高, 表明该尺度土壤有效水与地形因子相关关系最强, 而沟道最弱。主要原因可能是沟道地形陡峭, 沟道内样点坡度均较大, 且主要集中在沟道边坡中下部, 地形因子彼此间差异较小, 进而难以体现地形变化引起的土壤有效水差异; 相反流域尺度上样点间地形因子差异最大, 因此与地形的关系最密切。就不同地形因子而言, 流域尺度土壤有效水与坡度呈显著正相关关系, 即坡度越大土壤有效含水量越高, 主要是因为沟道样点坡度和土壤有效含水量均较坡面高; 但坡面和沟道尺度土壤有效水与坡度相关关系均不显著。不同尺度坡向与土壤有效水均为正相关关系, 其中流域和坡面尺度与坡向相关关系明显强于沟道。这主要是因为这两个尺度上不同坡向上均有较多样点分布(图 1a), 因此由坡向引起的土壤有效水空间变异易得到体现。一般地, 流域尺度与高程呈负相关关系, 这主要是由于沟道土壤有效含

水量高于坡面; 而坡面和沟道尺度均与高程正相关, 即高程越高土壤有效含水量越大, 这可归结于高程与坡度之间存在显著负相关关系。以上分析表明不同尺度影响土壤有效水空间分布的主导地形因子不一致。

土壤有效水与地形因子相关关系呈现明显的季节性特征。流域尺度上春季和秋季土壤有效水与高程相关系数明显低于夏季, 但坡度和坡向变化不明显。坡面尺度上高程与土壤有效含水量相关关系在春季和秋季反而有所增强, 同样坡度和坡向变化不明显。与 2.1 部分土壤有效水均值季节性特征结合分析可知, 土壤有效水大小影响高程与其相关关系, 流域尺度土壤有效含水量较低时, 高程对土壤有效水空间分布的影响较强, 土壤有效水较高时, 高程的影响减弱, 而坡面尺度恰好相反。沟道尺度上所有地形因子与土壤有效水相关关系无明显变化。此外, 就不同土层而言, 春季不同尺度整体上表层相关系数最高, 而夏秋两季土层间无明显的变化规律。

表 4 土壤有效水与地形因子的 Pearson 相关系数

Table 4 The Pearson correlation coefficients of available soil moisture and terrain attributes

季节 Season	土层 Depth (cm)	流域 Watershed			坡面 Hillslope			沟道 Gully		
		坡度 Slope	坡向 Aspect	高程 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	高程 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	高程 Elevation
春季 Spring	10	0.184 **	0.358 **	-0.158 *	0.059	0.472 **	0.133	-0.093	0.328 **	0.26
	20	0.156 *	0.321 **	-0.017	0.049	0.390 **	0.327 **	-0.037	0.329 **	0.324 *
	40	0.161 *	0.262 **	-0.087	0.025	0.331 **	0.301 **	-0.087	0.298	0.245
	60	0.147 *	0.256 **	-0.106	0.004	0.331 **	0.228 **	-0.1	0.277	0.287
夏季 Summer	10	0.190 **	0.237 **	-0.296 **	-0.055	0.304 **	-0.065	-0.084	0.28	0.265
	20	0.152 **	0.281 **	-0.226 **	-0.103	0.353 **	0.048	-0.081	0.258	0.320 *
	40	0.234 **	0.243 **	-0.305 **	-0.122	0.333 **	0.101	-0.059	0.321 *	0.319 *
秋季 Fall	60	0.205 **	0.252 **	-0.265 **	-0.139	0.345 **	0.106	-0.073	0.343 *	0.394 **
	10	0.149 *	0.278 **	-0.202 **	0	0.356 **	0.084	-0.135	0.289	0.108
	20	0.12	0.280 **	-0.049	0.022	0.326 **	0.230 **	-0.066	0.293	0.197
	40	0.167 *	0.136 *	-0.014	0.071	0.098	0.304 **	-0.059	0.358 *	0.369 *
	60	0.140 *	0.147 *	0.015	0.057	0.078	0.319 **	-0.084	0.443 **	0.448 **
	坡度 Slope	1.000			1.000			1.000		
	坡向 Aspect	-0.141 *	1.000		-0.087	1.000		-0.275	1.000	
	高程 Elevation	-0.505 **	0.147 *	1.000	-0.151 *	0.148 *	1.000	-0.435 **	0.259	1.000

注:表中坡度为坡度正切值,坡向为坡向余弦值。* 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著; ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著。Notes: The slope here is expressed as the tangent value of slope, and the aspect is expressed as the cosine value of aspect. The single asterisk (*) denotes the significance at $p < 0.05$ level, and double asterisks (**) denotes the significance at $p < 0.01$ level.

<http://pedologica.issas.ac.cn>

3 讨论

本文基于黄土丘陵区园则沟流域 213 样点(坡面 171 个,沟道 42)的土壤有效水数据,研究坡面、沟道和小流域三个尺度土壤有效水空间变异特征。坡面 171 个样点分布在不同的土地利用类型和地形(包括不同坡位、坡向和坡度);沟道样点虽然较少,但是覆盖了沟道边坡不同微地形和坡向,因此具有较好空间代表性。三次采样分别在黄土丘陵区春、夏、秋典型季节内无降雨期间进行,且与前次降雨间隔时间超过 5 d,减少了前期降雨的直接影响,能够较好地反映土壤有效水空间分布的季节性特征。因此本文研究数据在刻画黄土丘陵区土壤有效水空间变异及其季节性特征方面是可行的。但同时也应该注意到,沟道由于土壤水测定难度大,土壤有效水数据总体样本量较小,且样点多位于沟道边坡中部和下部,因此在对比分析坡面与沟道土壤有效水差异、沟道土壤有效水与地形因素关系时存在一定的不确定性。此外,由于三次采样均在 2010 年,关于不同水文年(丰水年、枯水年和平水年)对土壤有效水时空变异特征的影响尚未涉及。

坡面系统和沟道系统是黄土丘陵区小流域两个主要空间单元,本文研究结果表明不同季节沟道土壤有效水均值均显著高于坡面(表 1 $p > 0.05$ 或 $p > 0.01$),且具有更强的空间变异性,这表明沟道的存在显著改变了研究区土壤有效水空间分布特征,因此在研究黄土丘陵区小流域土壤(有效)水时空变异特征时须兼顾坡面和沟道。然而 Melliger 和 Niemann^[22]在美国科罗拉多州的研究发现,沟道虽然增强了研究区土壤水空间变异性,但没有显著改变平均含水量,主要原因可能是由于其研究区沟道平均深度仅为 2.5 m,与本研究区沟道深度(50 m 左右)存在明显差距。而 Gao 等^[10]在黄土丘陵区的研究结果表明沟道在增加土壤水空间变异的同时却降低了土壤平均含水量,可能是由于其研究区沟道样点多分布在半阳坡,而坡面样点更多分布在阴坡和半阴坡。土壤水空间变异程度通常是均值的函数,本文研究结果表明土壤有效水变异系数随均值增加呈显著指数递减变化趋势(图 2b)。这与欧美和黄土高原其他地区的研究结果相似^[21, 23]。但本文中土壤有效水标准差与均值关系不显著,而多数研究报道了显著的非线性关系^[21, 23]。本文研究结果表明当随机样点数达到 20 个时,继续增加样

点数对降低抽样引起的不确定性和估算误差的作用很有限,这与 Teuling 等^[17]和 Brocca 等^[20]在欧洲的研究结果类似,表明通过随机取样方式研究土壤(有效)水空间变异特征时,可以适当控制样点数量,以降低研究成本。

前期降雨、地形、土地利用和土壤性质均对土壤(有效)水空间变异有重要影响,前期降雨对土壤水空间变异的影响主要通过地形、土地利用和土壤性质的非均匀性来间接体现。由于黄土丘陵区小流域地形复杂且地形因子便于量化,因此本文重点探讨了土壤有效水空间变异与坡度、坡向和高程等地形因子的相关关系。本文研究结果表明不同地形因子中坡向对土壤有效水空间变异影响最大,这与胡伟等^[4]和 Huang 等^[13]在黄土高原的研究结果类似。二者还指出坡度、坡位和高程也是影响坡面和流域尺度土壤水空间变异的重要因素,而本文研究发现坡度对土壤有效水空间分布的影响较弱,且在坡面和沟道尺度不显著。本文还发现流域尺度夏季高程对土壤有效水空间变异的影响显著高于春季和秋季,而坡面尺度恰好相反。这与 Grayson 等^[24]、Gao 等^[10]、史志华等^[25]研究结果不一致。根据 Grayson 等^[24]解释,土壤湿度较高时,土壤水分主要受侧向水流运动影响,地形因素通过改变地表径流路径造成土壤水分在空间上重新分布;土壤湿度较低时,土壤水分主要受入渗与蒸散发等垂向水分运动影响,地形因子的作用将削弱。但就本研究而言,流域尺度夏季土壤有效水最低,然而流域内高差较大(> 200 m)且地貌破碎,流域较低位置和阴坡位置由于地形遮挡降低了太阳辐射的强度和时长,造成土壤有效水较其他部分明显偏高,高程对土壤有效水空间分布的影响较明显。春秋两季虽然土壤有效水较高,但是土壤水分测定期间均无降雨,地形造成的降雨和地表径流重新分配难以体现,而且黄土区壤中流不明显^[26],高程对土壤有效水空间分布的影响明显减弱。坡面尺度相反的主要原因可能在于坡面样点高差较小,由高差造成的对太阳辐射的遮挡不明显,特别是夏季太阳高度角较大,高差对太阳辐射的影响进一步减弱。

与黄土丘陵区已有相关研究相比,本文不同之处在于在小流域尺度同时考虑了坡面和沟道两个空间单元的土壤有效水,更加系统揭示了土壤有效水空间变异及其季节性特征,这对于该区小流域尺度土壤水资源评价具有重要参考价值。坡面与沟道土壤有效水时空特征存在差异的事实也表明两

<http://pedologica.issas.ac.cn>

个空间单元存在不同的土壤水文和生态水文过程,特别是沟道直接关系流域产汇流过程,并且衔接坡面产汇流路径,因此有必要对黄土丘陵区坡沟系统土壤(有效)水时空变异特征进行深入研究。

4 结 论

研究区沟道土壤有效水均值和空间变异性(标准差和变异系数)显著高于坡面,流域尺度介于二者之间,表明沟道的存在显著改变了研究区土壤有效水时空变异特征。流域、坡面和沟道尺度土壤有效水空间变异均表现出较强的季节性特征,秋季土壤有效水均值最高而空间变异性最低,夏季土壤有效水均值最低但变异系数最大。流域尺度夏季土壤有效水分布无明显正态性,而坡面和沟道在不同季节均服从正态或对数正态分布。

土壤有效水变异系数随均值增大呈现显著的指数递减变化趋势,而标准差随均值变化无显著的变化趋势。随着样点数量的增加,土壤有效水抽样不确定性和估算误差均呈非线性递减变化趋势。对于各尺度、土层和季节,当随机样点数达到 20 个时,继续增加样本数量对抽样的不确定性和估算误差的降低作用有限。

流域和坡面尺度土壤有效水与坡向呈显著正相关关系且明显高于坡度和高程,而沟道尺度与各地形因子相关关系均较弱。流域和坡面尺度土壤有效水与高程相关关系呈现明显的季节性特征,流域尺度夏季土壤有效水与高程存在显著负相关关系且明显高于春秋两季,而坡面尺度则恰好相反。

致 谢 感谢王英文博士和史银光博士在数据采集中的无私帮助。

参 考 文 献

- [1] 张向炎,史学正,于东升,等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响. 水科学进展,2010,21(1): 23—29. Zhang X Y, Shi X Z, Yu D S, et al. Effects of antecedent soil moisture on hillslope runoff-generation and soil erosion over red soil-mantled landscapes (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 23—29
- [2] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721—1730. Li X Y. Mechanism of coupling, response and adaptation between soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions (In Chinese). *Science China: Earth Science*, 2011, 41(12): 1721—1730
- [3] 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. 地理学报,2000,55(4): 428—437. Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau—semivariograms (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 428—437
- [4] 胡伟,邵明安,王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间异质性研究. 水科学进展,2006,17(1): 74—81. Hu W, Shao M A, Wang Q J. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 74—81
- [5] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报,2012,32(16): 4961—4968. Yao X L, Fu B J, Lü Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4961—4968
- [6] 刘志鹏,邵明安. 黄土高原小流域土壤水分及全氮的垂直变异. 农业工程学报,2010,26(5): 71—77. Liu Z P, Shao M A. Vertical variations of soil moisture and total nitrogen in small catchment on Loess Plateau (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 71—77
- [7] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素. 自然资源学报,2005,20(4): 483—492. Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. Spatial pattern of soil water and its influencing factors in a gully catchment of the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 483—492
- [8] 谢云,刘宝元,伍永秋. 切沟中土壤水分的空间变化特征. 地球科学进展,2002,17(2): 278—282. Xie Y, Liu B Y, Wu Y Q. Spatial distribution of soil moisture in a gully watershed (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(2): 278—282
- [9] van den Elsen E, Xie Y, Liu B Y, et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. *Catena*, 2003, 54: 93—115
- [10] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 87: 357—367
- [11] 胡伟. 黄土高原小流域土壤含水量与饱和导水率的时空变异. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所,2009. Hu W. Temporal-spatial variability of soil water content and saturated hydraulic conductivity in a small watershed of the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2009
- [12] Qiu Y, Fu B J, Wang J, 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. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49: 723—750
- [13] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. Effect of land use and topography on spatial variability of soil moisture in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Ecology*, 2012, 5(6): 826—833
- [14] 高晓东,吴普特,赵西宁,等. 黄土丘陵区沟道小流域土壤

- 有效储水量估算. 水利学报, 2013, 44(6): 734—742. Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Estimating spatial mean available water storage in a small catchment of the hilly area of the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 734—742
- [15] 王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究. 土壤学报, 2008, 45(3): 550—554. Wang R, Liu W Z, Li Z. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 550—554
- [16] Wei J B, Xiao D N, Zeng H, et al. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. Environmental Geology, 2008, 53(8): 1663—1672
- [17] Teuling A J, Uijlenhoet R, Hupet F, et al. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10: 755—767
- [18] 刘苑秋, 郭圣茂, 王红胜, 等. 退化石灰岩红壤区四种人工林旱季土壤水分的空间变异. 土壤学报, 2010, 47(2): 229—237. Liu Y Q, Guo S M, Wang H S, et al. Spatial variability of soil moisture in four plantations in degraded limestone red soil region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2): 229—237
- [19] Wang C, Zuo Q, Zhang R. Estimating the necessary sampling size of surface soil moisture at different scales using a random combination method. Journal of Hydrology, 2008, 352(3/4): 309—321
- [20] Brocca L, Tullo T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. Journal of Hydrology, 2012, 422/423: 63—75
- [21] Famiglietti J S, Ryu D, Berg A A, et al. Field observations of soil moisture variability across scales. Water Resources Research, 2008, 44, W01423, doi: 10.1029/2006WR005804
- [22] Melliger J J, Niemann J D. Effects of gullies on space-time patterns of soil moisture in a semiarid grassland. Journal of Hydrology, 2010, 389: 289—300
- [23] 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. Geoderma, 2011, 162: 260—272
- [24] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. Water Resources Research, 1997, 33: 2897—2908
- [25] 史志华, 朱华德, 陈佳, 等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2012, 23(4): 889—895. Shi Z H, Zhu H D, Chen J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and its relationships with environmental factors at small catchment level (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 889—895
- [26] 张秀英, 冯学智, 赵传燕. 基于 GIS 的黄土高原小流域土壤水分时空分布模拟——以定西安家沟为例. 自然资源学报, 2005, 20(1): 132—139. Zhang X Y, Feng X Z, Zhao C Y. GIS-assisted modeling of temporal and spatial distribution of soil water content in Loess Plateau—A case study in Anjiagou Catchment (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 132—139

SPATIAL VARIABILITY OF AVAILABLE SOIL MOISTURE AND ITS SEASONALITY IN A SMALL WATERSHED IN THE HILLY REGION OF THE LOESS PLATEAU

Gao Xiaodong^{1,2} Wu Pute^{1,2} Zhang Baoqing¹ Huang Jun¹ Zhao Xining^{1,2*}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on the available soil moisture (ASM) data collected from the 213 sampling sites over a small typical watershed in the hilly region of the Loess Plateau, spatial variability of soil available moisture at the scale of watershed, hillslope and gully and its seasonality (spring, summer and fall) was analyzed separately. Results show that the ASM, no matter at what scale, displays relatively strong spatial variability and ASM in gullies is higher in mean and spatial variability (Standard Deviation and Variation coefficient) than in hillslopes. The ASM also showed higher normality at gully and hillslope scales than at watershed scale. Spatial variability at all the three scales varies with the mean of ASM, and variation coefficient descends exponentially with the increasing mean. ASMs at the watershed and slope scales are closely and positively related to slope aspect, with correlation coefficient being higher than that its correlation with slope and elevation. However, the correlation coefficients of ASM with size of a gully and various landform factors are all low. The spatial variability of available soil moisture exhibits apparent seasonality. The ASM in fall, among the three seasons, is the highest in mean, but the lowest in variability. However, the ASM in summer is just the other way around. At the watershed scale, the ASM in summer is much higher than that in spring and fall in correlation coefficient with elevation,

<http://pedologica.issas.ac.cn>

whereas it is in a reverse pattern at the slope scale. Besides, the uncertainty of the sampling of ASM and the estimation errors display a nonlinear descending trend with the increasing number of samples. However, when the number of sampling sites exceeds 20, the effect of increasing the number of samples becomes very limited. The findings presented here are expected to improve the understanding of seasonality of ASM spatial distribution of gully catchment in the Loess Plateau and could help design optimal sampling strategy of soil moisture.

Key words The Loess Plateau; Small watershed; Soil moisture; Spatial variability; Seasonality

(责任编辑:汪枳生)