

# 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素

张 瑞<sup>1,3</sup>, 曹 华<sup>2</sup>, 王云强<sup>1</sup>, 黄传琴<sup>1</sup>, 谭文峰<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 为了解不同土地利用方式和地形条件下土壤含水率的数量特征及其变异规律, 以黄土高原丘陵沟壑区纸坊沟小流域为研究对象, 利用经典统计学方法系统分析了小流域尺度土壤含水率的空间变异性。结果表明: 不同土地利用方式下土壤平均含水率之间呈极显著差异, 其顺序为: 农田 > 草地 > 林地 > 灌木地; 土壤含水率在土壤剖面上呈先减小后增大的趋势。地形条件显著影响土壤含水率, 其中梯田 > 沟底 > 坡地 > 山顶; 不同坡位土壤含水率的顺序为坡下 > 坡上 > 坡中, 不同坡向间为阴坡 > 阳坡。上述土壤含水量的变异程度均为中等。在小流域尺度, 土地利用和地形对土壤水分具有显著的交互作用。相关结果可为黄土丘陵沟壑区的土壤水分管理、土地利用结构优化、不同地形条件下的植被布局提供参考。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 土地利用; 地形; 土壤含水率; 空间变异性

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)05-0052-07

## Spatial Variability of Soil Moisture and Its Influence Factors in Watershed of Gully Region on the Loess Plateau

ZHANG Rui<sup>1,3</sup>, CAO Hua<sup>2</sup>, WANG Yun-qiang<sup>1</sup>, HUANG Chuan-qin<sup>1</sup>, TAN Wen-feng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau/Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** To elucidate the quantitative characteristics and variation pattern of soil moisture in different land uses and terrain conditions, classical statistics were used to analyze the spatial variability of soil moisture in small watershed in the gully region of the Loess Plateau. The results indicated that the differences of average soil moisture among different land uses reached the extremely remarkable level, which showed as the order of farm land > grass land > forest land > shrub land. Soil moisture in profiles decreased firstly and then increased. Soil moisture was significantly affected by terrain conditions, which performed as terrace > gully bottom > slope land > the top of hills. Soil moisture was the highest at down slope, next was at up slope, and the lowest was observed at middle slope. Soil moisture on the shady slope was higher than that on the sunny slope. Different land uses and terrain conditions had a significant interaction in terms of soil moisture at the small watershed scale. The results obtained above can provide evidence for soil water management, optimization of land use structure and vegetation deployment in different terrain condition.

**Key words:** watershed in gully region of Loess Plateau; land use; topography; soil moisture; spatial variability

土壤水分是土壤—植物—大气连通体 (SPAC) 的关键因子, 也是土壤系统物质运移、养分循环流动的重要载体。在黄土高原土壤水分是农业可持续发展和植被恢复的主要限制因子, 影响土壤侵蚀<sup>[1]</sup>、植

被生长及植被恢复等过程<sup>[2-3]</sup>。另一方面, 土壤水分具有高度的空间异质性<sup>[4-5]</sup>。

近年来, 许多学者对黄土高原土壤含水率的空间分布与影响因素做了深入研究, 取得了一些重要进

收稿日期: 2012-02-26

修回日期: 2012-03-27

资助项目: 中国科学院百人计划项目“黄土剖面黏粒矿物的组成特点及其土壤演化与环境演变”; 黄土高原水土侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目 (10502-Z14)

作者简介: 张瑞 (1986—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境研究。E-mail: ruizhanghs@163.com

通信作者: 谭文峰 (1971—), 男, 湖北巴东人, 研究员, 主要从事土壤化学与环境研究。E-mail: wenfeng.tan@hotmail.com

展<sup>[6-10]</sup>。但已有报道多为单一的地形或土地利用与土壤含水率之间的关系,对不同土地利用方式和地形部位土壤含水率空间变异性对比研究较少。与此同时,在研究尺度上大都集中于坡面或者小区尺度,在小流域尺度上的研究较少。

在黄土高原土壤侵蚀与生态恢复综合治理过程中,小流域是基本结构单元。因此以小流域为研究对象,系统分析土壤水分的变异性及其影响因素具有重要意义。黄土丘陵沟壑区土壤水分对土地利用和地形的响应、以及其变异规律是该地区生态恢复植被建设、土地利用结构优化中的重要基础。有研究表明,在小流域尺度上,地形和土地利用是影响土壤含水率空间变异的重要因素<sup>[11]</sup>。因此,本文以黄土丘陵沟壑区安塞县纸坊沟小流域为研究对象,通过野外实地高密度取样,深入分析不同土地利用和地形条件下的土壤水分状况、空间变异规律及其交互作用,以期为该区土壤水分管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为陕西省安塞县纸坊沟流域,该区位于黄土高原典型丘陵沟壑区(36°51'N,109°19'E)。流域面积 8.27 km<sup>2</sup>,海拔 1 010~1 431 m,属暖温带半干旱气候区,年均降水量 490 mm,7—9 月降水量占全年降水的 61%,干燥指数 1.48,年均气温 8.8℃,≥10℃年积温 2 800~3 500℃。该区的植被类型区属森林草原区,以旱生的天然灌木群落[如狼牙刺(*Caragana rosea*)、扁核木(*Prinsepia utilis*)、杠柳(*Periploca sepium*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等]、人工群落以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana microphylla*)为主;土地利用类型主要以林地、灌木林地、草地和农田为主;土壤类型主要为黄绵土<sup>[12]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析方法

在纸坊沟小流域内,采用网格法结合土地利用类型进行采样,间距为 300 m×300 m,每个点以 GPS 进行定位,共采集 80 个样点(图 1)。土地利用类型图由中科院水保所区域室提供。采集每个样点时用直径为 4 cm 的土钻分层取样,在 0—60 cm,60—200 cm 土层分别以 10 cm,20 cm 为间隔进行采样,每个样点采集 13 个土样,采集的土样置于铝盒带回实验室,采用经典烘干法(105~110℃,10 h)测定土壤含水率,使用质量百分比表示。不同土地利用方式下样品采集情况见表 1。

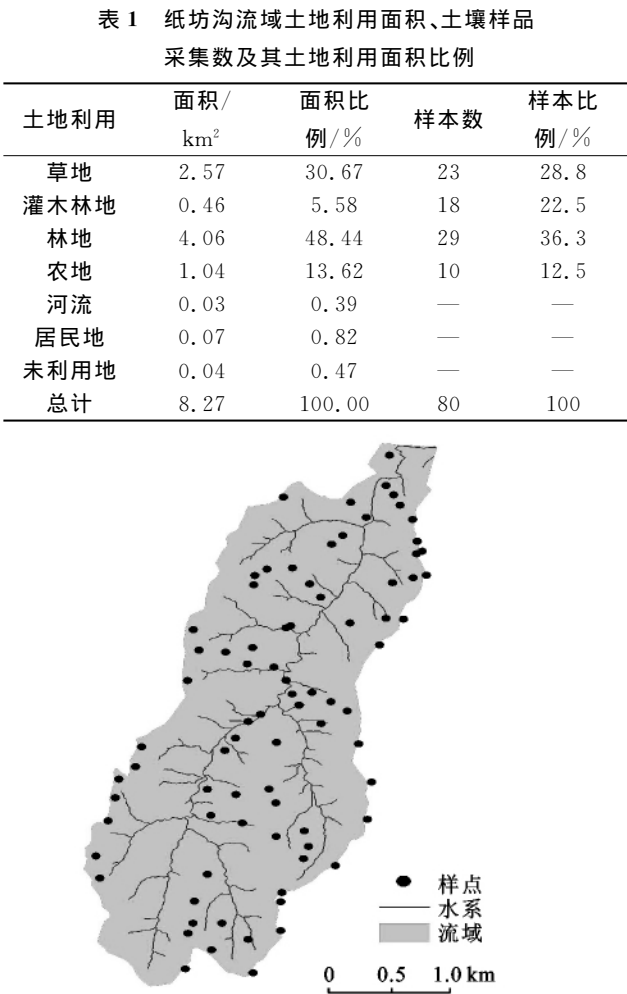


图 1 纸坊沟样点分布

采样工作于 2011 年 7 月 6 日至 7 月 25 日进行。采样前期有少量降雨,据气象资料,此次降水量为 11.5 mm,为消除降雨及其再分布对水分空间变异的影响,本文剔除了 0—20 cm 土层的土壤水分数据,仅对 20—200 cm 土壤水分状况进行分析。

用 SPSS 16.0 和 Excel 2003 计算各层平均土壤含水率、标准差和变异系数,并进行方差分析、多重比较等;用 ArcGIS 9.3 和 Sigmaplot 10.0 进行相关地统计分析和图件的制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式下的土壤水分特征

#### 2.1.1 不同土地利用方式土壤含水率的统计特征值

变异系数( $C_v$ )表明了特征参数的空间变异程度,是土壤含水率离散程度的量度<sup>[13]</sup>。根据 Nielsen 的划分标准,当  $C_v \leq 10\%$  时为弱变异性,当  $10\% < C_v < 100\%$  时为中等变异性,当  $C_v \geq 100\%$  时为强变异性。表 2 数据表明,整个流域土壤含水率介于 2.31%~23.50%,平均为 8.22%,变异系数为 42.5%,为中等变异。在 4 种土地利用方式中,农田平均含水率

(13.26%)显著高于草地、林地和灌木地;与农田相比,草地、林地、灌木地的含量分别降低 32%,45%,55%。4 种土地利用下土壤水分的变异系数介于 29.16%~35.1%,均为中等变异,但农地的变异系数最小,为 29.16%。

表 2 纸坊沟流域不同土地利用方式下的土壤含水率

土地利用类型	样本数	土壤含水率/%				变异系数/%
		最小值	最大值	平均值	标准差	
农田	10	7.45	23.50	13.26A	3.86	29.16
草地	23	3.18	19.53	9.06B	2.92	32.22
林地	29	2.31	14.91	7.30C	2.50	34.31
灌木地	18	3.36	16.21	5.96D	2.11	35.41
总计	80	2.31	23.50	8.22	3.49	42.50

注:大写字母不同表示在  $P<0.01$  水平上差异显著。

将 4 种利用方式土壤含水率的平均值进行方差分析,结果表明土壤含水率间呈极显著差异(表 2),且这种差异大小表现为:农田>草地>林地>灌木地。这种变化的主要原因可能有是研究区农田地貌类型主要是沟坝地和梯田,坡耕地较少,且分布在坡度较小的地方。沟坝地处于沟道当中,长期接受坡面径流的补给;而梯田改变了原始的地形,具有坡面汇流的作用,增加了降雨的入渗量。此外,农作物较乔灌木耗水量小,也是导致农田含水率高的原因。草地植被根系比农作物根系深,可利用较深层次的土壤水分,但与乔灌木相比,草地耗水率明显偏低。同时,草地多分布于地势较平坦的地形,径流损失较小,其含水率比林地和灌木地高。林地与灌木地的主要植被分别为刺槐和柠条,这两种植被根系分布较深,能有效地利用深层土壤水,使得土壤含水率较低。此外,林地与灌木地大部分处于坡地,使得径流在此处无法汇集,入渗到土壤中的降雨量就少,且刺槐林随着生长发育,对水分的需求加大,土壤含水率逐渐减小,最后使得土壤含水率长期处于较低的水平。与刺槐相比,人工柠条的细根系主要集中在 0—200 cm,且密度高于其它植被类型<sup>[14]</sup>,具有强烈的消耗水分能力。王志强等<sup>[15]</sup>在对黄土高原不同植被类型的水分研究表明,柠条地土壤含水率明显低于其他植被类型。

2.1.2 不同土地利用方式下土壤含水率的垂直分布特征 土壤含水率在垂直方向上的分布变化受降雨、蒸散、地形、土地利用等因素的影响。从不同土地利用类型土壤含水率的垂直变化趋势图(图 2)可见,土层深度为 20—50 cm 时,灌木地、林地、草地的土壤含水率随土层深度的增加而逐渐减少;50 cm 以下时,灌木地、林地和草地都随着土层深度的增加而增加,但林地与草地在 140 cm 处出现相对低湿,在 160 cm 处出现相对高湿。这与李洪建等<sup>[16]</sup>和胡伟等<sup>[17]</sup>的研

究结果一致。林地与灌木地植被根系较深,一方面大量消耗土壤水分;另一方面通过垂直方向上的水分吸收削弱了含水率在剖面上的波动。农田土壤含水率在 20—200 cm 土层范围内变异较大,表现为先增加、后减小、再增加的趋势,以 100 cm 处土壤含水率最低。农地土壤含水率在剖面上的干湿波动与自身的土壤物理性质(土壤空隙分布、机械组成)和人为对土壤的翻耕及田间管理措施有关<sup>[18]</sup>。

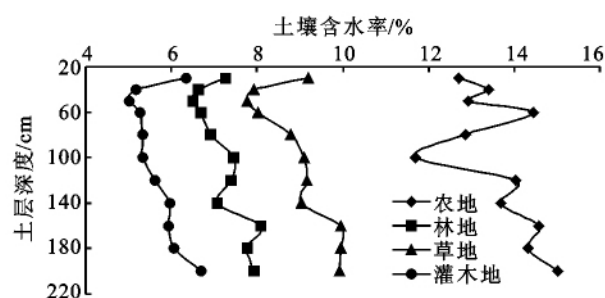


图 2 不同土地利用方式下土壤含水率的垂直分布

表 3 为不同土地利用下不同土层深度含水率,对每层数据用 K—S 方法进行正态分布检验,经检验每层数据均符合正态分布。4 种土地利用方式下各层土壤水分的变异系数范围分别为 19.17%~44.73%,25.73%~41.50%,28.02%~45.77%,6.14%~33.28%,均为中等变异;随着土层深度的增加,各土层的变异系数没有明显的变化规律。但从不同土地利用方式下各土层土壤含水率平均值与标准差、变异系数之间的 Pearson 相关系数(表 4)可知,农田、草地、林地各土层土壤含水率均值与变异系数、标准差的相关性都不显著,但灌木地各层土壤含水率与标准差、变异系数呈极显著( $P<0.01$ )正相关,说明灌木地各层之间土壤含水率的变异性随土壤含水率均值的增加而增加,与土壤含水率在剖面上的分布表现出一致性。同时,4 种不同土地利用方式下的标准差与对应的变异系数之间呈极显著正相关。

## 2.2 地形对土壤含水率空间变异的影响

### 2.2.1 不同地形条件下土壤含水率的统计特征值

不同地形条件下土壤含水率的统计结果(表 5)表明,在不同地形条件下,土壤含水率表现为梯田(9.77%)>沟底(8.73%)>坡地(8.37%)>峁顶(8.25%)。方差分析表明这种差异达到了显著水平。4 种地形条件下土壤水分的变异系数介于 35%~46%,为中等变异。造成这种差异的主要原因:(1)研究区梯田主要分布在地势较低、坡度较小的区域,梯田改变了原始的地形,不仅具有坡面汇流的作用,能增加降雨的入渗量,还能接受较高地形水分的输入,降雨在坡面发生再分配;沟坝地处于沟道中,长期接受坡面径流的补给,使得梯田、沟底比坡地和峁顶的土壤含水

率要高。(2) 黄土高原地区降雨产流以超渗产流为主<sup>[19]</sup>, 峁顶接受的水分主要来自降雨, 没有来自其它的水分补给。峁顶的潜在蒸散量大于其它部位<sup>[7]</sup>, 且 峁顶部位的太阳辐射比其它部位大, 风速较大, 造成这一地形位置上蒸散比其他地形强烈的多, 使得峁顶含水率最低。

表 3 不同土地利用方式下土层深度土壤含水率及变异系数 %

土层深度/ cm	农田				草地			
	样本数	均值	标准差	变异系数	样本数	均值	标准差	变异系数
20—30	10	12.72	3.84	30.20	23	9.20	2.20	23.91
30—40	10	13.39	3.99	29.83	23	7.93	2.24	28.25
40—50	10	12.92	4.12	31.90	22	7.77	2.16	27.84
50—60	10	14.45	5.45	37.67	22	8.02	2.36	29.39
60—80	9	12.88	4.06	31.53	22	8.77	2.33	26.62
80—100	8	11.69	5.23	44.73	22	9.08	3.2	35.18
100—120	8	14.05	4.41	31.36	22	9.17	3.81	41.50
120—140	8	13.69	3.09	22.61	22	9.04	3.22	35.61
140—160	8	14.56	2.88	19.77	20	9.97	2.56	25.73
160—180	8	14.33	3.58	25.02	20	9.96	2.80	28.15
180—200	8	15.03	4.51	30.01	20	9.92	2.80	28.21

土层深度/ cm	林地				灌木地			
	样本数	均值	标准差	变异系数	样本数	均值	标准差	变异系数
20—30	29	7.27	2.40	33.05	18	6.35	2.11	33.28
30—40	29	6.62	2.32	35.04	18	5.17	1.24	24.00
40—50	29	6.49	2.19	33.77	17	5.02	0.83	16.49
50—60	29	6.70	2.13	31.79	17	5.27	0.91	17.32
60—80	28	6.90	2.46	35.71	17	5.33	0.86	16.14
80—100	28	7.44	2.09	28.02	16	5.32	1.71	32.25
100—120	28	7.40	2.31	31.23	16	5.63	1.87	33.19
120—140	27	7.06	3.23	45.77	16	5.96	1.22	20.46
140—160	26	8.07	2.35	29.16	16	5.94	1.91	32.09
160—180	26	7.78	2.43	31.21	15	6.05	1.19	19.72
180—200	26	7.94	2.33	29.38	15	6.68	1.78	26.66

表 4 不同土地利用下各土层土壤含水率平均值与标准差、变异系数之间的 Pearson 相关系数

变量	土地利用	各层土壤 含水率的 均值	各层土壤 含水率的 标准差	各层土壤 含水率的 变异系数
各层土壤 含水率的 均值	农田	1.00	0.36	0.74
	草地	1.00	0.50	0.14
	林地	1.00	0.20	-0.29
	灌木地	1.00	0.89**	0.79**
各层土壤 含水率的 标准差	农田		1.00	0.95**
	草地		1.00	0.93**
	林地		1.00	0.88**
	灌木地		1.00	0.98**
各层土壤 含水率的 变异系数	农田			1.00
	草地			1.00
	林地			1.00
	灌木地			1.00

注: \*\* 表示相关系数在 0.01 的水平上显著(二尾检验)。

利用 ArcGIS 软件的地统计分析模块对流域土壤含水率数据进行正态分布检验, 土壤含水率数据经

对数转化后符合正态分布。因此, 可将土壤含水率数据进行插值。图 3 为纸坊沟流域 0—200 cm 土层土壤含水率的空间分布特征。结果显示, 土壤含水率遵循沟底>坡地>峁顶, 与(表 5)统计的结果前面一致。流域中土壤含水率高于 9.97% 的斑块主要分布在沟底及梯田, 而低于 7.58% 的斑块主要分布在峁顶。在坡面上, 7.58%~9.97% 占据主导, 且变化平缓。

表 5 纸坊沟不同地形条件下的土壤含水率

地形	样本数	土壤含水率/%				变异系 数/%
		最小值	最大值	平均值	标准差	
峁顶	28	2.31	23.50	8.25a	3.81	46.0
坡地	40	2.75	19.53	8.37a	2.92	35.0
沟底	6	3.18	17.18	8.73a	4.02	46.0
梯田	6	4.88	21.59	9.77b	4.31	44.0

注: 不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平上差异显著。

2.2.2 土壤含水率在不同坡位上垂直变化及其差异特征 为了更好地说明地形对土壤含水率的影响, 将坡高不同部位划分为坡上、坡中和坡下。由不同坡面

土壤含水率及变异系数(表 6)可见,土壤含水率大小表现为坡下>坡上>坡中。土壤含水率的变异系数达 32% 以上,为中等变异,其中坡下最小,坡中与坡上基本相同。这表明土壤含水率的差异性在坡地上随海拔的增加越来越显著。方差分析显示,3 种坡位之间土壤含水率存在显著或极显著差异,其中坡中与坡下、坡上土壤含水率呈极显著差异( $P<0.01$ ),坡上与坡下呈显著差异( $P<0.05$ )。有研究表明,受植被、地貌、土地类型、降雨再分配等因素的影响,土壤含水率一般表现为:坡下>坡中>坡上,本文中土壤含水率从坡中到坡下的变化与已有研究结果相同<sup>[20-22]</sup>,即土壤含水率在坡位上的分布表现出从坡中到坡下越来越大的规律。另外,对于文中坡上土壤含水率大于坡中,这与胡伟等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。造成这种差异的原因可能为:(1) 坡上的坡度较缓,有利于降雨的入渗而减少径流的损失。(2) 不同坡位上的植被差异所引起的。

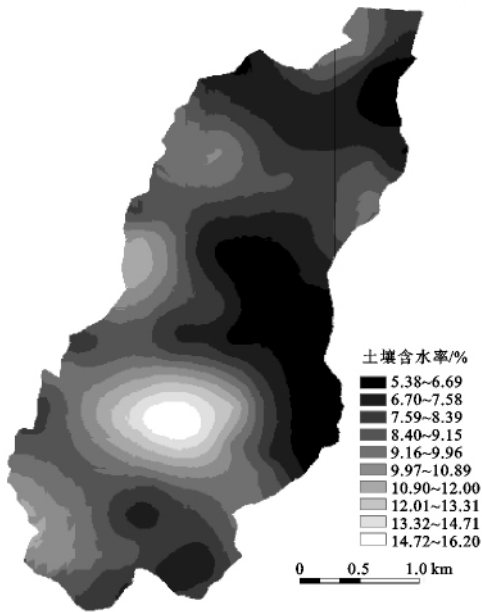


图 3 流域土壤含水率空间分布  
表 6 不同坡位土壤含水率的差异

坡位	样本数	均值/%	标准差	标准误	变异系数 /%
坡上	10	7.95Aa	2.99	0.30	38
坡中	5	6.24Bb	2.51	0.31	40
坡下	25	8.70Cc	2.81	0.16	32
总计	40	8.21	2.92	0.13	36

注:不同小写字母表示在  $P<0.05$  上差异显著,不同大写字母表示在  $P<0.01$  上差异显著。

从不同地形条件下土壤含水率的垂直变化趋势图(图 4)可见,坡上、坡中和坡下土壤含水率在 20—50 cm 随着土层的增加而逐渐减少,在 50 cm 以下都表现为随土层厚度的增加逐渐升高,这与不同土地利

用方式下土壤含水率垂直变化相一致(图 3)。

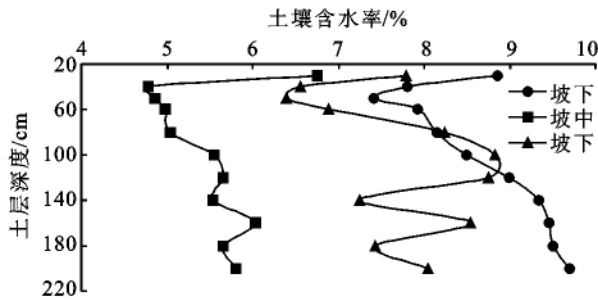


图 4 不同坡位土壤含水率的垂直分布

2.2.3 坡向对土壤含水率的影响 由于坡向变量单一,本研究将坡向划分为阳坡和阴坡两种。由表 7 可见,阳坡的土壤含水率为 8.51%,变异系数为 33%,为中等变异;阴坡土壤含水率为 7.87%,变异系数为 38%,亦为中等变异。大量研究也表明<sup>[21-24]</sup>,阴坡的土壤含水率大于阳坡。方差分析表明阴坡的土壤含水率显著高于阳坡( $P<0.05$ )。造成这种差异的原因为:(1) 坡向直接影响到太阳辐射的再分配,阳坡蒸发大于阴坡,从而影响了土壤含水率的分布。(2) 阳坡的植被较少,土壤水分的散失也大于阴坡。阴坡和阳坡的土壤含水率均为中等变异,且阳坡的变异程度大于阴坡,但差异并不显著。造成这种变异格局的原因是太阳光热和地表性质的相互作用使土壤水分在阳坡分布的不均匀性程度要大于阴坡<sup>[17]</sup>。

同一地形部位上,不同土地利用方式对土壤含水率的影响存在显著差异(表 8)。研究区沟底的土地利用方式单一,主要是农田,而林地、灌木地、草地样本数较少。因此,本文排除沟底,只对土地利用与茆顶、坡地之间的交互作用进行分析。方差分析表明,不同土地利用方式土壤含水率相互之间存在极显著差异。坡地农田(13.17%)土壤含水率极显著( $P<0.01$ )高于草地(7.62%)、林地(9.43%)和灌木地(6.74%),其顺序为农田>林地>草地>灌木地。在茆顶也是农田的土壤含水率最高,表现为农田(15.12%)>草地(9.34%)>林地(7.07%)>灌木地(5.15%)。茆顶和坡地不同土地利用方式的土壤含水率变异系数都达到了中等变异;同时,不同土地利用方式之间随着土壤含水率的增加变异系数逐渐减小。

表 7 不同坡向土壤含水率的差异

坡向	样本数	均值/%	标准差	标准误	变异系数/%
阴坡	19	8.51a	2.80	0.17	33
阳坡	21	7.87b	3.01	0.20	38

2.3 地形和土地利用对土壤含水率的交互作用

与表 2 对比分析发现,同一地形条件不同土地利用方式土壤含水率与整个流域不同(表 8)。在农田、

草地条件下,土壤含水率为峁顶>流域>坡地,而在林地、灌木地条件下,为坡地>流域>峁顶。这说明地形和土地利用方式共同制约着土壤含水率的空间变异性,单一考虑地形或者土地利用对土壤含水率的影响,不能全面揭示流域尺度上土壤含水率空间变异的规律。因此,研究流域土壤水分的空间变异及其影响因素应充分考虑地形和土地利用的交互作用。

表8 同一地形条件不同土地利用方式下的土壤含水率

地形	土地利用	样本数	平均值	标准差	变异系数/%
坡地	农田	2	13.17A	2.74	21
	草地	12	7.62B	2.30	30
	林地	16	9.43C	3.01	32
	灌木地	10	6.74D	2.14	32
峁顶	农田	3	15.12A	3.61	24
	草地	9	9.34B	2.53	27
	林地	10	7.07C	2.72	38
	灌木地	6	5.15D	1.53	30

### 3 讨论与结论

土壤含水率与土地利用、地形密切相关。地形(坡位、坡向、坡长等)通过对光照辐射、温度、降雨等的再分配来影响植被类型和土壤养分、水分的迁移<sup>[25]</sup>;地形还可反映土壤产流、汇流的特性,即水分再分配的特性<sup>[26]</sup>,进而影响土地利用方式。土地利用与土壤含水率的空间变异性具有双向作用:一方面,土壤含水率通过时空差异影响土地利用<sup>[27-28]</sup>;另一方面,土地利用方式的不同又驱使土壤含水率的空间变异性发生改变<sup>[28-30]</sup>。

在研究区小流域,不同土地利用方式和地形对土壤含水率有着重要影响,且土壤含水率在不同土地利用方式间呈显著差异,并表现为农田>草地>林地>灌木地。农田主要以梯田为主,有效地控制了降水的流失并承接了上部的汇水,且农作物耗水量较乔灌木低,使得农田的土壤含水率最高。乔灌林地主要分布在峁顶和坡地,控制雨水的能力弱于梯田,对径流的汇集作用也较低。另外,乔灌木植被的根系主要分布在0—200 cm土层<sup>[14]</sup>,且灌木地柠条的细根系主要集中在该土层,且密度高于其它植被类型<sup>[31]</sup>;根系强烈的消耗土壤水分能力,使得土壤含水率低于其它土地利用方式。草地主要是自然恢复的天然草地,根系分布较浅,对土壤水分吸收消耗小,土壤含水率较高。4种土地利用方式土壤含水率空间变异性均为中等变异。

地形是地表过程的决定性因素,地形与土壤的形成、发育及其地表水分、沉积物运移关系密切<sup>[26]</sup>。从地形入手,研究土壤含水率与地形之间的关系,本研

究区土壤含水率表现为梯田>沟底>坡地>峁顶。峁顶、坡地、沟底、梯田在流域中所处位置不同,接受的太阳辐射、降雨再分配和风速的不同,最终引起土壤含水率的不同。研究区不同地形条件下的土壤水分均为中等变异。由此可见,地形条件和土地利用方式对土壤水分格局的影响具有重要的意义。所以,在黄土高原丘陵区植被建设和土地利用结构优化中,应充分考虑土地利用和地形的交互作用。

本文应用经典统计学原理以纸坊沟流域为例,分析研究了黄土高原丘陵区土壤水分的影响因素及其空间变异性。得出如下结论:不同土地利用方式下土壤含水率均表现出中等变异性,均值之间呈极显著差异性,并表现为农田>草地>林地>灌木地。在土壤剖面上呈先减小后增大的趋势;地形条件对土壤含水率影响顺序为梯田>沟底>坡地>峁顶;土壤含水率沿坡位方向从上到下表现为先减小后增大的趋势,而变异程度表现为坡中>坡上>坡下;土壤含水率在坡向上表现为阴坡>阳坡,变异程度为中等变异。

#### 参考文献:

- [1] 穆兴民,陈霁伟.黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,13(4):39-44.
- [2] 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研究[J].中国水土保持科学,2007,5(3):28-32,51.
- [3] 刘晨峰,尹婧,贺康宁.林下植被对半干旱区不同密度刺槐林地土壤水分环境的指示作用[J].中国水土保持科学,2004,2(2):62-67,79.
- [4] Gomez P A, Martínez M M, Albaladejo J, et al. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments[J]. Journal of Hydrology, 2001,253(1/4):211-226.
- [5] Famiglie J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1/4):259-281.
- [6] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
- [7] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].水土保持通报,2002,22(4):6-9.
- [8] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5-9.
- [9] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土丘陵区土地利用与土壤水分的时空关系[J].自然资源学报,2001,16(6):521-524.
- [10] 王云强,张兴昌.黄土区小尺度坡面土壤含水率时空变异性研究[J].水土保持学报,2008,22(2):32-37.
- [11] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil

- moisture[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(3/4): 203-224.
- [12] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [13] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 38-40.
- [15] 王志强, 刘宝元, 海春兴, 等. 晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 53-58.
- [16] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 515-519.
- [17] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81.
- [18] 杜建涛, 何文清, Nangia V, 等. 北方旱区保护性耕作对农田土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 25-29.
- [19] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [20] 李裕元, 邵明安, 张兴昌. 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 41-44.
- [21] 徐学选, 刘文兆, 高鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 52-55.
- [22] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [23] 贾志清, 宋红竹, 陈涛, 等. 黄家二岔小流域土壤水分空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(5): 88-91.
- [24] 卢金伟, 李占斌, 郑良勇, 等. 陕北黄土区土壤水分养分空间分异规律[J]. 山地学报, 2002, 20(1): 108-111.
- [25] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 334-342.
- [26] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 647-654.
- [27] 张军涛, 艾华, 于长英. 东北农牧交错区水分条件的空间分异及其对土地利用的影响[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 233-238.
- [28] 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.
- [29] Yoo C, Kim S. EOF analysis of surface soil moisture field variability [J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(8): 831-842.
- [30] Ursino N, Contarini S. Stability of banded vegetation patterns under seasonal rainfall and limited soil moisture storage capacity[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(10): 1556-1564.
- [31] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 321-327.

(上接第 51 页)

(4) 对同一区域不同市进行比较评价, 有利于通过对比揭示同一区域不同市水土保持效益的差异及其产生的根源, 这对指导今后的水土保持工作具有重要的现实意义。

由于数据和自身条件所限, 本文的研究比较宏观和浅薄。对南水北调中线水源区(陕南段)各项水土保持措施效益进行了宏观上的分析与评价, 并总结分析不同措施的作用和大小, 但对造成该结果的原因未进行深入的分析研究。产生这些效益的好坏和能否达到工程健康运行的要求也没有给出定性的结论, 因此还有待进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 王礼先, 朱金兆. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [2] 党志良, 林启, 史淑娟. 水土保持综合治理效益分析与评价: 以丹凤县陈家沟小流域为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 535-539.
- [3] 景可, 焦菊英. 水土保持措施与效益评价研究: 以陕北安塞县为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 312-316.
- [4] 许静, 王玉玺, 樊华. 东北黑土区小流域综合治理措施及效益评价: 以振祥小流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 95-100.
- [5] 王文生, 李红月. 郝家流域水土保持治理措施效益分析[J]. 中国水土保持, 1998(9): 37-39.
- [6] 孙昕, 李德成, 梁音. 南方红壤区小流域水土保持综合效益定量评价方法探讨: 以江西兴国县为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 373-380.
- [7] 刘建强, 李延忠, 时光新. 榆林小流域水土保持综合治理措施及其效益分析[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6): 51-54.
- [8] Shipitalo M J, Edwards W H. Runoff and erosion control with conservation tillage and reduced-input practices on cropped watersheds [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 46(1/2): 1-12.
- [9] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1/2): 122-128.
- [10] 王玮. 南水北调中线水源区(陕西段)水土保持生态补偿研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.