

黄土丘陵区影响土壤水分的非气候因子之定量标征

姚志宏¹, 杨勤科², 王粉萍³, 李锐⁴

(1. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011; 2. 西北大学 城市与资源学系, 西安 710069;

3. 周至县农业局, 陕西 周至 710400; 4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:土壤前期含水量是影响土壤侵蚀模拟与预测的重要因素之一,许多研究关注了气候(降雨等)条件对土壤前期含水量的影响。选择黄土丘陵区桑塔小流域,通过野外定点观测,分析了非气候因子(土地利用、坡度、坡向、坡位)对土壤水分的影响,提出了各因子对土壤水分的影响系数和计算方法,建立了研究区 5—10 月各月土壤水分模拟方程。主要结果:(1) 研究区土壤水分平均含量在 5—10 月期间均表现为先下降后升高的趋势,在 8 月份达到最低。不同土地利用类型土壤水分含量由大到小的顺序依次为:梯田>坡耕地>荒草地>果园>刺槐林>柠条林。(2) 依据坡度、坡向、坡位、土地利用类型对土壤水分的影响,采用标准化处理,计算出了影响土壤水分的土地利用系数、坡向系数和相对坡位系数。(3) 以土壤含水量为因变量,以坡度和经过标准化处理得到的影响土壤水分的土地利用系数、坡向系数、相对坡位系数为自变量,进行回归分析,得到 5—10 月各月的土壤水分模拟方程,其决定系数 R^2 为 0.54~0.64, F 统计量 P 值均远远小于 0.05 显著水平,可用于同类区域的土壤水分模拟。

关键词:黄土丘陵区; 土壤水分; 影响系数; 定量标征

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0023-06

Quantitative Marking of Non-climatic Factors Influencing Soil Moisture in Loess Hilly Area

YAO Zhi-hong¹, YANG Qing-ke², WANG Feng-ping³, LI Rui⁴

(1. College of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric

Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an

710069, China; 3. Zhouzhi Country Municipal Agricultural Bureau, Zhouzhi, Shaanxi 710400, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil moisture is one of the most important factors influencing soil erosion modeling and prediction. A lot of research results have contributed to evaluation of climatic factors such as rainfall. The impacts of non-climatic factors, such as land-use, slope degree, slope aspects and slope position, on soil moisture were analyzed based on the field observation data in Loess hilly region. The influence coefficient on soil water of each factor and calculation method were proposed. And soil moisture simulation equation of each month from May to October was developed. The main results were: (1) The average soil water content of all land use types from May to October followed the same trend as a reversed parabola: decreasing firstly and increasing late, and the lowest point was in August from high to low level, the soil water contents were in the sequence of terraced land>cropping slope land>waste grassland>orchard land>*Robinia pseudoacacia* land>*Cara-gana korshinskii* land; (2) Based on the effects of slope degree, land use, slope aspect and slope position on vertical distribution of soil water contents, the influence coefficient on soil water of each factor was calculated by standardization algorithm; (3) Taking monthly soil water contents as the dependent variable and slope degree, standardized slope aspect and land-use type, relative slope position coefficient as the independent variables, the regression equations for each month from May to October were fitted. The regression result showed that the R^2 ranged from 0.54 and 0.64 and P valuables are far less than 0.05. And it was meaningful for soil

收稿日期:2012-02-16

修回日期:2012-04-08

资助项目:水利部公益性行业专项经费项目“基于 GIS 的黄土丘陵区年侵蚀产沙经验模型研究”(20120108-02)

作者简介:姚志宏(1970—),女,安徽阜阳人,博士,主要研究方向:区域水土流失定量评价与 GIS 应用。E-mail:yaozhih04@mails.gucas.ac.cn

water simulation in the similar areas.

Key words: Loess hilly area; soil moisture; influence coefficient; quantitative marking

前期土壤含水量是影响降雨入渗、产流和产沙的重要因子^[1-3],对土壤侵蚀模型的模拟和预测尤为重要。但是,由于土壤含水量的实测资料很少,而且在降雨前的一瞬间更不容易得到整个流域面上的土壤含水量数值,因此流域内前期水分数据很难获得。建立模型时往往通过前期降雨建立经验关系确定^[4],或根据前期降雨采用日模型推算求得^[5],其在一定程度上反映了土壤的干湿程度,但其并没有反映真实土壤含水量水平。因此,对土壤含水量影响因子的研究尤为重要。

黄土高原丘陵沟壑区地形破碎、人为干扰强烈,土壤水分的空间分布受到非气候因素如土地利用、坡度、坡向、坡位等显著影响^[6-7]。已有的研究多是在点尺度定性分析单因子对土壤水分空间分布的影响^[8-9],或是在小流域尺度进行土壤水分的整体行为的研究^[10-11]。随着 GIS 及其空间数据的应用,地理制图^[12]、空间统计^[13]和引入湿度指数^[14]等方法可模拟土壤水分的空间变异。但是由于影响土壤水分的因子较为复杂,既有定量的,又有定性的,且各因子之间还存在着交互影响,因此,很难进行定量表征,本文基于已有研究^[12-14],通过对小流域不同土地利用类型、不同坡度、坡向和坡位影响下的土壤水分的定点观测和分析,探索影响土壤水分的非气候因子如土地利用、坡向、坡位等的定量表征,以期为区域水土流失模型中土壤水分的估算提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区小流域为安塞县沿河湾镇桑塔小流域,面积约 3.28 km²。处于暖温带半湿润向半干旱过渡区,年平均降水量 549 mm,其中 60% 以上的降雨集中在 6—9 月。属典型的黄土丘陵区,地形破碎,沟壑纵横。土壤类型为黄土母质上发育而成的黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重。该流域海拔 1 130~1 400 m,地面相对起伏达 200 m,地面坡度超过 20°的面积占一半以上,是分析地形对土壤水分影响的典型区域;土地类型主要为梁峁坡地和谷坡地;土地利用类型主要有刺槐林地、柠条林地、坡耕地、梯田、果园和荒草地等。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤水分的野外采集和室内处理

观测法,根据不同地形状况和土地利用类型,在研究区内共选取 47 个典型样点,测定时间为 2008 年 5—10 月,每月中旬采一次样。每个样点均利用手持 GPS 定位,并记录样点的经纬度、土地利用类型、坡度、坡向、海拔高度。用土钻采样,对采样点的土壤剖面每隔 20 cm 进行采集,采样深度为 500 cm,每次取样重复 2 次。采用烘干法测定,用烘箱在 105℃ 条件下连续烘干 10 h,再用精度为 0.001 g 的电子天平称重,计算土壤水分的质量百分含量。将各采样点的经纬度、土地利用类型、坡度、坡向、海拔高度和各层的土壤含水量记录在 Excel 表格下进行统计。定性分析土壤水分与土地利用、坡度、坡向、坡位的关系

1.2.2 定性因子的标准化处理 将定性因子土地利用类型、坡向、坡位分别利用荒草地、北坡和流域出口高程为基准,计算得到各样点的土地利用、坡向、坡位对土壤水分影响系数,即土地利用系数、坡向系数和相对坡位系数。

1.2.3 Excel 下的回归分析 将各样点的土地利用系数、坡度、坡向系数、相对坡位系数和每月 0—500 cm 深土壤平均含水量统计在 Excel 表中,以土壤含水量为因变量,土地利用系数、坡度、坡向系数和相对坡位系数为自变量,调用 Excel 数据分析工具中的回归函数,建立 2008 年 5—10 月土壤水分模拟模型。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤水分随月份变化

将各土地利用类型所有采样点 5—10 月份每个月 0—500 cm 各层土壤水份含量取平均,得到不同土地利用类型土壤水分随月份变化关系曲线(图 1)。

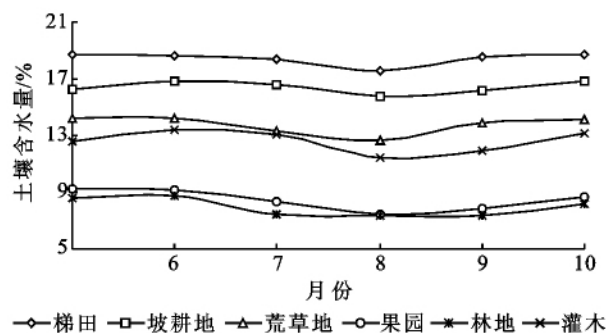


图 1 不同土地利用类型土壤水分随月份变化

图 1 表明,5—10 月份,不同土地利用类型土壤水分含量均先下降,后升高,且在 8 月份达到最低。在黄土高原丘陵区,降水几乎是土壤水分的唯一来源的,蒸散损失是土壤水分损失的主要形式,土壤水分

的季节性变化受该地区降雨的强烈影响,同时与气温和植物的生长阶段密切相关。

不同土地利用类型土壤含水量明显不同,表现为:梯田>坡耕地>荒草地>果园>林地>灌木。这主要因为不同土地利用类型,植被根系分布深度及密度差异很大,从而导致土壤的蒸发、植被的蒸腾量和根系的呼吸耗水量不同,由此引起土壤的水分分布不同。

2.2 不同土地利用类型土壤水分垂向变化

将每种土地利用类型所有点每月0—500 cm的土壤水分分层取平均,得到各土地利用类型5—10月土壤垂向水分曲线(图2),由图可知,在0—500 cm深度范围内,不同土地利用类型不同层次土壤水分明显不同,总体上,土壤水分含量为:梯田>坡耕地>荒草地>果园>林地>灌木。在0—150 cm深度内,梯田和坡耕地的土壤含水量相当,变化趋势一致,因为梯田和坡耕地种植的作物一样,其根系分布深度及密度一致,也间接说明了农作物根系影响土壤含水量变化的深度大致为150 cm;在150—500 cm范围内,梯田的土壤含水量明显大于坡耕地的土壤含水量,这是因为梯田拦蓄的径流较多,土壤储水量较大;荒草地和果园、林地和灌木分别在400 cm深度土壤含水量趋于一致,由此也说明了荒草地、果园、林地和灌木根系影响土壤水分变化的深度大致为400 cm。

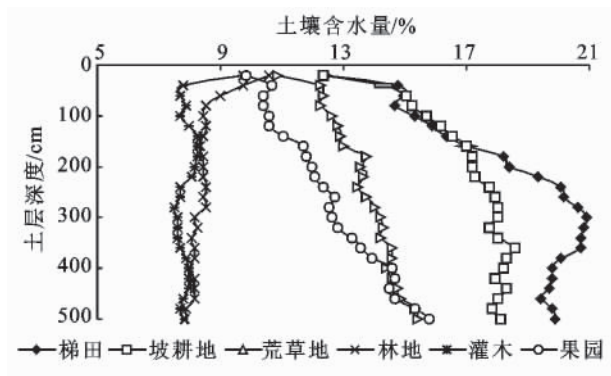


图2 不同土地利用类型土壤水分垂向变化

2.3 坡度、坡向、坡位对土壤水分垂直分布的影响

2.3.1 坡度 在小流域的样点中选取土地利用类型、坡向、坡位相同,坡度不同的样点进行分析,将各样点5—10月份0—500 cm的各层土壤水分含量进行平均,得到各土地利用类型下不同坡度的样点的土壤水分垂直剖面,总体上各土地利用类型表现为随坡度的增加,土壤含水量降低的趋势。以荒草地为例,由不同坡度的土壤水分垂直分布(图3)可以看出,在一定深度范围内坡度愈大,土壤水分含量愈低。这是由于随着坡度的增大,降水的径流系数增大,而入渗到土体中的水量减少。

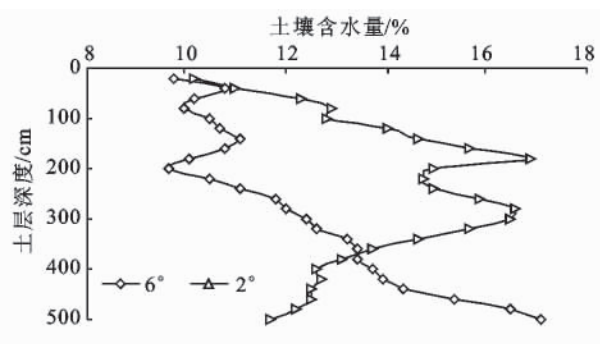


图3 不同坡度荒草地土壤水分分布

2.3.2 坡向 在样点中选取土地利用类型、坡度、坡位相同,坡向不同的样点进行分析,将各样点5—10月0—500 cm的各层土壤水分含量进行平均,得到各土地利用类型下不同坡向的样点的土壤水分垂直剖面。通过分析,不同坡向的土壤含水量由大到小顺序为:北坡、东北坡、西坡、西北坡、东南坡、西南坡、东坡、南坡。以荒草地为例,从图4—5可以看出,在其它条件相同时,在一定土壤深度范围内,荒草地的土壤水分含量为:北坡>东北坡>西北坡>南坡。而在一定深度以下则结果相反,这可能与不同坡向植被类型及其根系耗水特征有关。

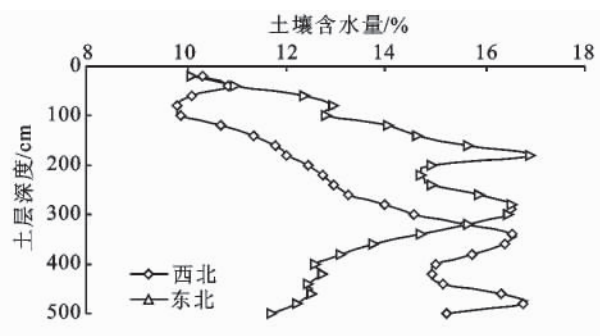


图4 不同坡向荒草地土壤水分分布

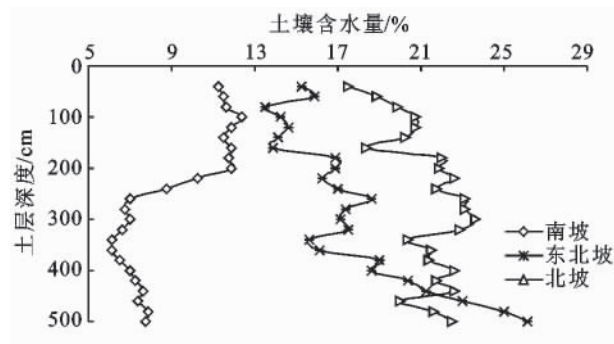


图5 不同坡向荒草地土壤含水量的垂直分布

2.3.3 坡位 在样点中选取土地利用类型、坡度、坡向相同,坡位不同的样点进行分析,将各样点5—10月0—500 cm的各层土壤水分含量进行平均,得到各土地利用类型下不同坡位样点的土壤水分垂直剖面(图6)。总体上在同一个坡面上,土壤不同深度含水量呈现出由坡顶向坡下部逐渐增高的趋势。这是因

为,一方面从坡顶到坡上部、坡中部、坡下部,随着汇流面积的增大,上方汇流增多,地表积水厚度增大,降水入渗进入土壤的水分比例较大,时间较长;另一方面,从坡顶到坡下部,风力不同,土壤蒸发逐渐减弱,造成了水分含量的逐渐增大^[15]。但是,只在一定的土层深度范围是这种规律,这主要是因为土地利用类型的影响,使得降雨、蒸发对土壤水分影响的深度不同引起的。

2.4 土壤水分影响因子系数的计算

根据以上分析,结合实测数据,将定性变量进行标准化处理计算出土壤水分影响因子系数,作为定性因子对土壤含水量影响的定量表征。

2.4.1 坡向系数 将坡向划分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北。以实测土壤水分数据为准,选取

几组相同土地利用类型、相同坡度分级、不同坡向的土壤水分数据,分别计算出 2008 年 5—10 月 0—500 cm 土壤含水量的平均值,最后再取 6 个月的平均值作为确定坡向系数的比例基数(表 1)。

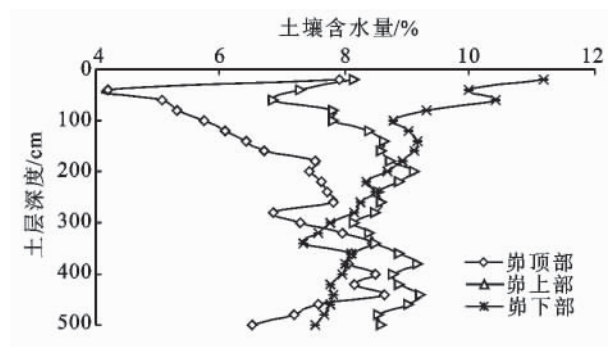


图 6 不同坡位柠条林土壤含水量的垂直分布

表 1 不同坡向系数统计计算结果

对比组	样点	土地利用类型	坡度/ (°)	坡向	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值
1	780	草地	10	北	13.84	13.69	13.38	12.87	13.02	13.68	13.41
	713	草地	10	西	11.80	11.65	11.86	11.87	11.78	12.26	11.87
2	781	草地	15	北	12.91	13.69	13.38	12.87	13.02	13.68	13.26
	793	草地	10	西南	11.05	10.79	11.46	9.56	9.44	10.53	10.47
3	802	林地	4	北	13.71	13.26	12.99	12.45	12.43	13.26	13.02
	798	林地	0	东	11.07	10.57	10.28	9.10	9.38	10.01	10.07
4	734	荒草地	8	北	21.99	15.76	18.2	14.59	22.83	22.7	19.35
	754	荒草地	10	东北	17.27	18.18	17.34	16.30	17.95	17.44	17.41
5	739	荒草地	3	西北	13.90	13.73	13.11	12.64	13.33	14.01	13.45
	741	荒草地	2	东北	14.41	14.23	13.59	13.22	13.72	14.50	13.94
6	763	果园	23	东南	13.86	14.73	14.07	13.65	13.47	14.63	14.07
	770	果园	22	南	13.34	13.19	12.97	12.58	12.52	13.23	12.97
7	778	耕地	20	东北	13.58	13.41	13.61	12.98	12.96	13.93	13.41
	778	耕地	18	南	12.86	11.28	11.02	10.59	10.24	11.26	11.21

将北坡的坡向系数设为 1,按照如下公式计算出对应坡向的系数:

$$Y_{\text{index}} = X_{\text{asp}} / X_{\text{north}} \quad (1)$$

式中: Y_{index} ——坡向系数; X_{asp} ——该坡向比例基数; X_{north} ——北坡比例基数。

对于没有直接和北坡构成对比的坡向,可以通过间接联系的坡向,通过以下公式计算出相对于北坡的系数:

$$Y_{\text{index}} = (X_{\text{asp}} / X_{\text{relative}}) \times (X_{\text{relative}} / X_{\text{north}}) \quad (2)$$

式中: Y_{index} ——坡向系数; X_{asp} ——该坡向比例基数; X_{relative} ——间接坡向比例基数; X_{north} ——北坡比例基数。

最后求得北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个坡向的坡向系数分别为 1, 0.90, 0.77, 0.81, 0.75, 0.79, 0.89, 0.87。能够反映出坡向对土壤水分的影响。

2.4.2 土地利用系数 以实测土壤水分数据为准,选取一组相同坡度分级、相同坡向、不同土地利用类

型的土壤水分数据,分别计算出 2008 年 5—10 月 0—500 cm 土壤含水量的平均值,最后再取 6 个月的平均值作为确定土地利用类型系数的比例基数(表 2),将荒草地的系数设为 1,按照如下公式计算出对应土地利用类型系数:

$$Y_{\text{index}} = X_{\text{lu}} / X_{\text{grass}} \quad (3)$$

式中: Y_{index} ——土地利用类型系数; X_{lu} ——该土地利用类型比例基数; X_{grass} ——荒草地比例基数。计算得到农地、林地、灌木、果园的系数分别为 1.06, 0.65, 0.63, 0.69。

2.4.3 相对坡位系数 由于黄土丘陵区沟壑纵横,地貌复杂,梁、峁、沟的上、中、下部位不能准确地定量表达,因此,选择小流域内的各样点的相对坡位系数,作为反映坡位的定量表达。计算公式:

$$X_{\text{Er}} = \frac{E - E_0}{E_0} \quad (4)$$

式中: X_{Er} ——相对坡位系数; E ——采样点高程; E_0 ——流域出口高程。

表 2 不同土地利用类型系数计算统计

样点号	土地利用类型	坡度/ (°)	坡向	坡位	0—500 cm						平均值
					5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
744	灌木	23	东	梁峁上部	9.79	9.88	8.56	8.14	8.22	9.14	8.96
756	林地	25	东	梁峁上部	10.29	10.51	9.17	7.66	8.33	9.61	9.26
753	荒草地	25	东	沟坡上部	14.63	14.82	14.20	13.53	13.76	14.89	14.30
764	坡耕地	22	东	沟坡中部	14.42	15.05	15.81	14.80	14.48	16.11	15.11
772	果园	20	东	梁坡中部	10.96	9.53	13.11	8.04	8.65	8.93	9.87

2.4.4 考虑影响因子系数的土壤水分模拟 把 2008 年 5—10 月典型土壤水分样点数据的坡向、土地利用类型、坡位分别利用坡向系数、土地利用类型系数、相对坡位系数进行重新赋值,然后将每月各样点 0—500 cm 的土壤平均含水量、坡向系数(X_{asp})、土地利用类型系数(X_{lu})、相对坡位系数(X_{Er})和坡度(X_{slope})进行统计(表 3),参与土壤水分模型构建的共 47 个样点数据。

表 3 2008 年 5—10 月参与土壤水分模型构建的数据

样点号	坡度	坡向	土地利用	相对坡	不同月份 0—500 cm 土层平均含水量					
	X_{slope}	系数 X_{asp}	系数 X_{Er}	位 X_{Er}	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
729	12	0.79	1.06	0.054	19.47	18.65	19.15	18.92	19.44	14.60
730	6	0.75	1.00	0.054	9.15	9.24	8.78	9.17	8.63	9.34
731	5	0.77	1.06	0.046	11.43	12.51	12.09	10.72	12.06	12.72
732	18	0.75	0.69	0.066	9.80	11.08	11.40	6.92	10.65	11.33
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
775	5	0.77	0.75	0.067	8.24	8.02	7.30	6.61	8.37	8.00

以土壤含水量为因变量,土地利用系数、坡度、坡向系数和相对坡位系数为自变量,调用 Excel 数据分析工具中的回归函数,得到 2008 年 5—10 月土壤水分模拟模型如下

5 月份: $Y = 9.28X_{lu} + 14.86X_{asp} + 0.037X_{slope} - 33.31X_{Er} - 4.26$ (5)

6 月份: $Y = 11.73X_{lu} + 9.92X_{asp} - 0.014X_{slope} - 22.14X_{Er} - 3.03$ (6)

7 月份: $Y = 13.03X_{lu} + 12.00X_{asp} - 0.017X_{slope} - 23.09X_{Er} - 6.28$ (7)

8 月份: $Y = 14.70X_{lu} + 6.72X_{asp} + 0.0033X_{slope} - 12.85X_{Er} - 5.55$ (8)

9 月份: $Y = 14.07X_{lu} + 16.23X_{asp} + 0.016X_{slope} - 30.91X_{Er} - 10.37$ (9)

10 月份: $Y = 13.42X_{lu} + 14.93X_{asp} + 0.016X_{slope} - 22.69X_{Er} - 9.15$ (10)

由模拟方程(5)—(10)可以看出,土壤含水量与土地利用类型系数、坡向系数、坡度均呈正相关,而与相对坡位系数呈负相关。各回归方程的相关参数详见表 4。

表 4 2008 年 5—10 月土壤水分模型相关参数统计

月份	复相关系数(R)	决定系数(R^2)	标准误差	F 统计量 P 值	回归系数 t 统计量的 p 值			
					X_{lu}	X_{asp}	X_{slope}	X_{Er}
5 月	0.73	0.54	2.919	7.76E-05	0.0045	0.045	0.95	0.019
6 月	0.74	0.55	2.725	1.58E-05	6.49E-05	0.140	0.80	0.037
7 月	0.76	0.57	2.815	1.8E-05	5.53E-05	0.092	0.78	0.040
8 月	0.77	0.59	2.644	9.76E-07	2.88E-07	0.028	0.95	0.030
9 月	0.80	0.64	2.695	1.18E-07	1.49E-06	0.009	0.76	0.002
10 月	0.79	0.60	2.643	6.23E-07	2.41E-06	0.014	0.76	0.019

表 4 说明,2008 年 5—10 月土壤水分模型方程的复相关系数 R 为 0.73~0.80,决定系数 R^2 均在 0.54 以上,8 月份的 R^2 为 0.64,说明该模拟方程可以解释 0—500 cm 土层深度土壤含水量 64% 以上的空间分布。而且各月回归模拟的 F 统计量 P 值均远远小于 0.005 显著水平,说明模型每次回归的效果显著,且

所选的变量和土壤水分都相关,可用于模拟预测土壤土壤水分分布状况。回归系数对应的 t 统计量的 p 值表明:土地利用系数、坡向系数、坡度和相对坡位系数的回归系数都显著不为零,说明上述系数都能解释土壤水分的变化,但是,土地利用系数的回归系数对应的 t 统计量的 p 值远远小于坡向系数、坡度和坡位

的回归系数对应的 t 统计量的 p 值,说明土地利用的变化更能反映土壤水分的变化;而坡度的回归系数对应的 t 统计量的 p 值较大,说明坡度在解释土壤水分变化时效果相对较差。

3 结论

通过对小流域不同土地利用类型、坡度、坡向和坡位影响下的土壤水分的实测数据分析,在定性分析土地利用和地形因子对土壤水分影响的基础上,对非气候因子土地利用、坡向、坡位等进行定量表征,并初步模拟 2008 年 5—10 月每月的土壤水分,得到如下主要结论:

(1) 不同土地利用类型土壤水分平均含量 5—10 月期间均呈先下降后升高趋势,且在 8 月份达到最低,并且不同土地利用类型土壤含水量明显不同,表现为:梯田>坡耕地>荒草地>果园>刺槐林地>柠条灌木地。坡度、坡向、坡位与土壤水分垂直分布关系密切。在一定深度范围内,在其它条件相同情况下,坡度愈大,土壤水分含量愈低;不同坡向的土壤含水量表现为从北坡、东北坡、西坡、西北坡、东南坡、西南坡、东坡、南坡依次减小。在同一个坡面上,土壤不同坡位含水量呈现出由坡顶向坡下部逐渐增高的趋势。

(2) 通过对定性变量的土地利用类型、坡向、坡位的标准化处理得到土地利用系数、坡向系数和相对坡位系数,能够反映土地利用类型、坡向、坡位对土壤水分分布的影响。求得的土地利用农地、林地、灌木、果园的系数分别为 1.06,0.65,0.63,0.69;北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个坡向的坡向系数分别为 1,0.90,0.77,0.81,0.75,0.79,0.89,0.87;相对坡位系数为各点高程和流域出口高程之差与流域高程的比值。

(3) 以土壤含水量为因变量,土地利用系数、坡度、坡向系数和相对坡位系数为自变量,回归分析得到 2008 年 5—10 月每月的土壤水分模拟方程,回归效果显著,能够反映小流域土壤水分的空间变化。但是土地利用系数、坡向系数、相对坡位系数虽都能解释土壤水分的变化,但土地利用的变化更能解释土壤水分的变化,坡度的解释效果较差。

本研究可为考虑土地利用和地形因子影响下的土壤水分估算提供方法。但是模拟过程是基于研究区的实测数据进行的,结果是否适于黄土丘陵区其它小流域还有待于验证。而且在小流域尺度,是假定降雨、蒸发和土壤类型均一,所以模拟时未考虑这些因

子,而在较大尺度的流域上应予以考虑。通过对回归模型相关参数的分析,说明坡度虽然与土壤水分相关(回归效果显著),但并不能很好解释土壤水分的变化,因此,在模拟土壤水分时可以选择坡度的替代因子,如地形湿度指数,来间接地反映土壤水分对坡度的响应。

参考文献:

- [1] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment; implications for runoff erosion control[J]. Catena, 1998, 32(1): 55-70.
- [2] 贾志军,王贾平,李俊义,等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持, 1987(9): 25-27.
- [3] Castillo V M, Gomez-Plaza A, Martinez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach [J]. Journal of Hydrology, 2003, 284(1/4): 114-130.
- [4] 王浩,雷晓辉,秦大庸,等. 基于人类活动的流域产流模型构建[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 14-18.
- [5] 赵人俊. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9.
- [6] 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[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 483-492.
- [7] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243-263.
- [8] 傅伯杰,王军,马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国科学基金, 1999(4): 225-229.
- [9] 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.
- [10] 黄明斌,康绍忠,李玉山. 黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 226-231.
- [11] 王国梁,刘国彬,常欣,等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
- [12] 焦峰. 基于 GIS 的黄土丘陵区土壤水库蓄水数量特征及其生态供水潜力评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [13] 段建军. 黄土高原地区土壤干层的分布状况与时空动态研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2006.
- [14] 王洪明. 基于 DEM 和实测数据的小流域土壤水分模拟[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [15] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992.