

# 基于 GIS 的黄土丘陵区小流域土壤水分模拟

姚志宏<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>1,3\*</sup>, 王春梅<sup>1</sup>, 李 锐<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 华北水利水电学院资源与环境学院, 河南 郑州 450011;  
3. 西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 为了探讨黄土丘陵区桑塔小流域土壤水分的时空变化规律, 在对定性数据如土地利用、坡向、坡位标准化处理的基础上, 通过野外定点观测和室内处理, 运用多元回归分析的方法, 对土壤水分与地形湿度指数、土地利用类型系数和坡向系数进行相关性分析, 建立了小流域土壤水分模型。结果表明: 土壤水分模拟方程的复相关系数均在 0.78 以上, 决定系数均在 0.65~0.72, F 统计量的 P 值远小于 0.01, 回归效果显著, 能够模拟小流域土壤水分的时空分布。

关键词: 黄土丘陵区; 小流域; 土壤水分; 模拟

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2011)03-0525-06

## Modeling Soil Moisture Based on GIS in Small Watershed of Loess Hilly Area

YAO Zhihong<sup>1,2</sup>, YANG Qingke<sup>1,3\*</sup>, WANG Chunmei<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;

2. College of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan Province 450011, China;

3. Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi Province 710069, China)

**Abstract:** The spatial and temporal variation of soil moisture content in small watersheds of Loess hilly area was studied at Sangta watershed. Data standardization was used for quantitative data processing based on in situ monitoring and lab analysis. The regression equations for each month from May to October were determined by taking monthly soil water contents as dependent variable and topographic wetness index, standardized slope aspects coefficient, land use coefficient and relative elevation coefficient as independent variables. Results showed that the multiple correlation coefficient R of regression equation were all above 0.78, coefficient of determination R<sup>2</sup> ranged from 0.65 to 0.72, they all reached significant level ( $P < 0.01$ ). This study is useful to estimate soil water contents for regional soil erosion modeling.

**Key words:** Loess hilly area; Small watershed; Soil moisture; Simulate

在黄土丘陵区, 土壤水分是制约植被恢复和生态重建的主要限制因子, 因此对该区土壤水分的研究意义重大。关于土壤水分的研究, 比较多的工作是在点尺度上定性分析单因子对土壤含水量空间分布的影响<sup>[1,2]</sup>, 以及对小流域尺度土壤水分整体行为的研究<sup>[4,5]</sup>。随着 GIS 及其空间数据的应用, 地理制图<sup>[6]</sup>、空间统计<sup>[7]</sup>和引入湿度指数<sup>[8,9]</sup>等方法可用于模拟土壤含水量的空间变异, 特别是地形湿度指数的引进, 考虑了土壤水分形成的机理, 是今后

土壤含水量模拟的方向。但由于土地利用、坡向、坡位等因子是定性因子, 无法定量地表达它们对土壤含水量的影响。因此, 本研究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含水量的定点观测和分析, 在利用标准化处理方法计算定性因子对土壤含水量影响系数的基础上, 探索小流域土壤含水量的模拟方法, 以期为区域水土流失模型中土壤前期含水量的估算提供支持。

收稿日期: 2010-04-17; 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 国家 973 研究项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407204) 资助

作者简介: 姚志宏(1970), 女, 安徽阜阳市人, 博士, 研究方向为基于 GIS 的区域水土流失定量评价, E-mail: yaozhih04@mails.gucas.ac.cn;

\* 通讯作者, Author for correspondence, E-mail: gkyang@ms.iswc.ac.cn

# 1 数据与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县沿河湾镇桑塌村小流域(E109°15′~109°18′, N36°40′~36°44′)。位于黄土高原中部,在气候上处于暖温带半湿润向半干旱过渡区,冬季干旱,夏秋多雨,太阳辐射较强,光照充足。年均降水量549 mm,其中60%以上集中在6-9月。地貌类型为典型的黄土丘陵区,植被类型处于暖温带森林草原区,又是典型受人类活动影响的水土流失严重区。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,易发生水土流失。土地利用类型主要有林地、坡耕地、梯田、果园和荒草地等。

## 1.2 数据

### 1.2.1 土壤水分数据的采集

土壤水分样点布设方案:按照土地利用-地貌类型组合的格局来布点,样点要覆盖主要土地利用类型、主要中小地貌类型、不同坡向、不同坡度级别和坡位的组合,共选取了46个样点。

土壤水分数据采样时间为2008年5-10月的中下旬,为了进行动态监测,各月采样样点相同。每个样点均利用手持GPS定位,并记录土地利用类型、坡度、坡向和海拔。土壤样品使用轻型人力钻采

集,每个采样点取样深度为500 cm,样品间距为20 cm。对当天所采集的土壤样品采用烘干法(105℃, 10 h)测定土壤含水量。

### 1.2.2 DEM

本研究所用的DEM是中国科学院水利部水土保持研究所遥感与GIS实验室用ANUDEM软件输出的水文关系正确的DEM数据,分辨率为5米(图1)。

### 1.2.3 地形湿度指数

在DEM基础上利用单流向算法,按照计算公式 $w = \ln(\alpha/\tan\beta)$ 计算得到地形湿度指数(图2)。式中, $w$ 为地形湿度指数, $\alpha$ 为单位等高线长度或单元栅格的汇流面积, $\beta$ 为局部坡度。其中 $\alpha$ 采用公式 $\alpha = A/L$ 来计算,式中 $A$ 为网格的总上坡汇水面积, $L$ 为网格周围入流方向上的有效等高线长度。

### 1.2.4 坡向

由DEM在ArcMap中Surface Analysis下生成10 m分辨率的坡向(图3)。

### 1.2.5 土地利用

在ERDAS Image软件下利用地形图对遥感影像进行校正,配准,误差控制在一个像元内。通过非监督分类并辅以目视解译,参考修订后的《土地利用现状调查技术规程》<sup>[10]</sup>,将研究区土地利用划分为7个地类,分别是:1-农地、2-果园、3-林地、4-灌木、5-荒草地、6-居民地和工矿、7-水体(图4)。

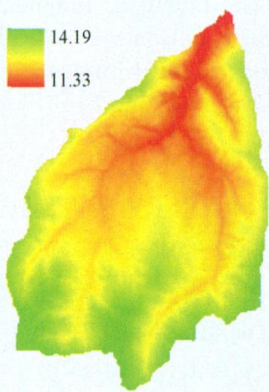


图1 数字高程模型  
Fig.1 DEM



图2 地形湿度指数  
Fig.2 Topographic wetness index



图3 坡向  
Fig.3 Slope aspects

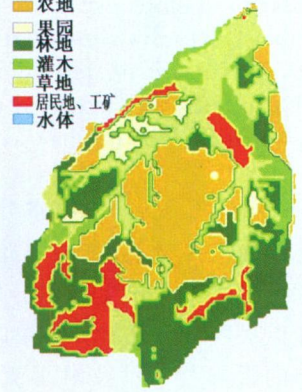


图4 土地利用类型  
Fig.4 Land use

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 Excel 2003 下的统计分析

将实测数据整理到Excel表中,计算各月各样点土壤水分含量。

### 1.3.2 定性数据的标准化处理

将土地利用类型、坡向、坡位分别利用荒草地系数、北坡坡向系数和流域出口高程为判断标准,得到各样点的土地利用系数、坡向系数和相对高程系数。

### 1.3.3 在 Excel 2003 下进行多元回归分析

将各样点的 2008 年 5-10 月的 0~500 cm 深土壤平均含水量、土地利用系数、坡向系数、地形湿度指数、相对高程系数统计到 Excel 2003 表中, 以土壤含水量为因变量, 以土地利用类型系数、坡向系数、地形湿度指数、相对高程系数为自变量, 调用 Excel 2003 数据分析工具中的回归函数进行多元回归分析, 建立 2008 年 5-10 月土壤水分模拟模型。

### 1.3.4 GIS 下的空间分析和运算

以 DEM 为基础, 在 GIS 下提取研究区土地利用类型系数、坡向系数、地形湿度指数、相对高程系数, 利用模拟方程, 完成每月土壤水分的栅格计算,

完成研究区土壤水分模拟, 并输出图。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡向对土壤水分的影响

将坡向重新划分为北、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)。

表 1 不同坡向系数统计计算表

Table 1 Calculation of slope aspects coefficient

对比组 Groups for comparison	样点 Spots	土地利用类型 Land use type	坡度(°) Slop degree	坡向 Slope aspect	0~500 cm 土层平均含水量 Average soil water content in the range of 0~500 cm						均值 Mean
					5月	6月	7月	8月	9月	10月	
					1	780	荒地 Waste grassland	10	北 North	13.84	
	713	荒地 Waste grassland	10	西 West	11.80	11.65	11.86	11.87	11.78	12.26	11.87
	781	荒地 Waste grassland	15	北 North	12.91	13.69	13.38	12.87	13.02	13.68	13.26
2	793	荒地 Waste grassland	10	西南 Southwest	11.05	10.79	11.46	9.56	9.44	10.53	10.47
	802	林地 Woodland	4	北 North	13.71	13.26	12.99	12.45	12.43	13.26	13.02
3	798	林地 Woodland	0	东 East	11.07	10.57	10.28	9.10	9.38	10.01	10.07
	734	荒地 Waste grassland	8	北 North	21.99	15.76	18.2	14.59	22.83	22.7	19.35
4	754	荒地 waste grassland	10	东北 Northeast	17.27	18.18	17.34	16.30	17.95	17.44	17.41
	739	荒地 Waste grassland	3	西北 Northwest	13.90	13.73	13.11	12.64	13.33	14.01	13.45
5	741	荒地 Waste grassland	2	东北 Northeast	14.41	14.23	13.59	13.22	13.72	14.50	13.94
	763	果园 Orchard land	23	东南 Aoutheast	13.86	14.73	14.07	13.65	13.47	14.63	14.07
6	770	果园 Orchard land	22	南 South	13.34	13.19	12.97	12.58	12.52	13.23	12.97
	778	耕地 Cropping slope land	20	东北 Northeast	13.58	13.41	13.61	12.98	12.96	13.93	13.41
7	778	耕地 Cropping slope land	18	南 South	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。

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

式中:  $Y_{index}$  为坡向系数,  $X_{asp}$  为该坡向比例基数,  $X_{north}$  为北坡比例基数。

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。

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

式中:  $Y_{index}$  为坡向系数,  $X_{asp}$  为该坡向比例基数,  $X_{relative}$  为间接坡向比例基数,  $X_{north}$  为北坡比例基数。

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。

### 2.2 土地利用对土壤水分的影响

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 深土层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。

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

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

### 2.3 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、土地利用类型分别利用坡向系数、土地利用类型系数进行重新赋值,然后将 0~ 500 cm 的土壤平均含水量  $Y$ 、坡向系数( $X_{asp}$ )、土地利用类型系数

( $X_{lu}$ ) 和地形湿度指数  $X_{wi}$  进行统计,得到 2008 年 5 - 10 月 46 个样点的各变量值(表 3)。

表 2 不同土地利用类型系数计算统计表

Table 2 Calculation of land use coefficient

样点 Spots	土地利用类型 Land use type	坡度(°) Slop degree	坡向 Slope aspect	0~ 500 cm 土层平均含水量 Average soil water content in the range of 0~ 500 cm						均值 Mean
				5月	6月	7月	8月	9月	10月	
				744	灌木 Woodland	23	东 East	9.79	9.88	
756	林地 Forestland	25	东 East	10.29	10.51	9.17	7.66	8.33	9.61	9.26
753	荒草地 Waste grassland	25	东 East	14.63	14.82	14.20	13.53	13.76	14.89	14.30
764	坡耕地 Cropping slope land	22	东 East	14.42	15.05	15.81	14.80	14.48	16.11	15.11
772	果园 Orchard land	20	东 East	10.96	9.53	13.11	8.04	8.65	8.93	9.87

表 3 2008 年 5- 10 月参与土壤水分模型构建的数据表

Table 3 The data to construction of equations for each month from May to October in 2008

样点号 Spots	$X_{lu}$	$X_{asp}$	$X_{wi}$	0~ 500 cm 土层平均含水量( $Y$ ) Average soil water content $Y$ in the range of 0~ 500 cm					
				5月	6月	7月	8月	9月	10月
				1	1.06	0.79	4.18	19.47	18.65
2	1	0.75	3.22	9.15	9.24	8.78	9.17	8.63	9.34
3	1.06	0.77	1.98	11.43	12.51	12.09	10.72	12.06	12.72
4	0.69	0.75	1.87	9.80	11.08	11.40	6.92	10.65	11.33
5	0.65	0.77	4.23	9.83	8.91	8.01	6.79	6.98	8.85
6	0.63	0.77	3.06	9.79	9.88	8.56	8.14	8.22	9.14
7	0.63	0.77	3.55	8.98	9.30	9.00	7.94	7.72	8.46
8	0.63	0.77	4.67	9.40	9.21	8.65	7.92	7.83	8.79
9	1.06	1	2.32	14.68	15.51	15.57	14.55	14.67	15.48
10	0.65	0.81	4.12	10.52	9.54	9.11	8.91	8.55	9.56
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
46	0.65	0.77	2.87	8.24	8.02	7.30	6.61	8.37	8.00

以 2008 年 5- 10 月土壤平均含水量  $Y$  为因变量,以土地利用类型系数  $X_{lu}$ 、坡向系数  $X_{asp}$  和地形湿度指数  $X_{wi}$  为自变量,调用 Excel 数据分析工具中的回归函数,建立了 2008 年 5- 10 月土壤水分模拟模型:

5月  $Y = 9.5X_{lu} + 16.38X_{asp} + 0.53X_{wi} - 11.11$  (4)

6月  $Y = 12.24X_{lu} + 8.57X_{asp} + 0.39X_{wi} - 6.17$  (5)

7月  $Y = 13.82X_{lu} + 7.67X_{asp} + 0.32X_{wi} - 6.96$  (6)

8月  $Y = 13.64X_{lu} + 5.89X_{asp} + 0.51X_{wi} - 7.50$  (7)

9月  $Y = 13.15X_{lu} + 5.72X_{asp} + 0.34X_{wi} - 3.05$  (8)

10月  $Y = 15.08X_{lu} + 8.33X_{asp} + 0.27X_{wi} - 8.22$  (9)

由方程(4)~ (9)可知,土壤水分与土地利用类型系数、坡向系数、地形湿度指数正相关,与相对高程系数负相关。回归方程相关参数见表 4。

表 4 2008 年 5- 10 月回归方程的相关参数统计表

Table 4 Corresponding parameters of the regression equations for each month from May to October in 2008

月份 Month	复相关系数 Multiple correlation coefficient(R)	决定系数 Coefficient of determination R <sup>2</sup>	标准误差 Standard error	F 统计量 P 值 F statistic P value	回归系数 t 统计量的 P 值 P value of the regression coefficient t statistic		
					$X_{lu}$	$X_{asp}$	$X_{wi}$
					5	0.78	0.60
6	0.82	0.67	2.09	1.03E-06	5.3E-06	0.0997	0.0704
7	0.81	0.65	2.38	1.89E-05	5.47E-05	0.215	0.202
8	0.85	0.72	2.00	2.13E-08	7.34E-08	0.180	0.011
9	0.85	0.72	1.76	1.44E-07	4.55E-08	0.143	0.163
10	0.83	0.69	2.30	1.61E-07	4.46E-07	0.11	0.243

由表 4 可知,2008 年 5- 10 月土壤水分模拟方程的复相关系数均在 0.78 以上,决定系数均在

0.65 以上, F 统计量  $P$  值均小于 0.01, 说明模型每次回归的效果达到极显著水平。可见模型所选取的变量对土壤水分的影响程度都较大, 可用于模拟土壤水分分布状况。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、坡向系数和地形湿度指数的回归系数都显著不为零, 说明土地利用系数、坡向系数、坡向系数、地形湿度指数、相对高程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和地形湿度指数对应的  $t$  统计量的  $P$  值, 说明土

地利用系数的回归系数比坡向系数和地形湿度指数的回归系数更为显著, 土地利用的变化更能反映土壤水分的变化。

### 2.4 模型应用

以桑塔村为应用区, 根据标准化处理结果, 将土地利用、坡向重新赋值, 得到土地利用系数图、坡向系数图(图 5 和图 6); 将地形湿度指数、土地利用系数和坡向系数分别代入模拟方程, 通过栅格计算得到研究区 5-10 月份土壤水分空间分布图(图 7~12)。

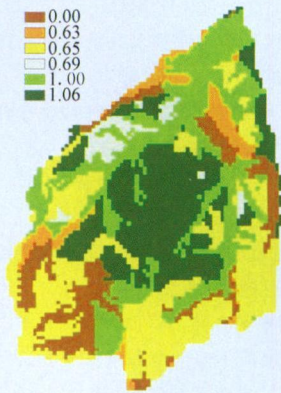


图5 土地利用系数

Fig.5 Land use coefficient

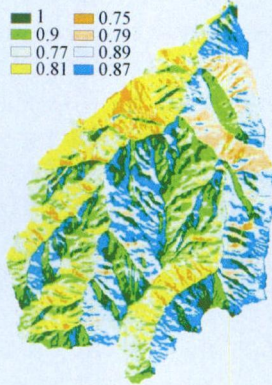


图6 坡向系数

Fig.6 Slope aspects coefficient

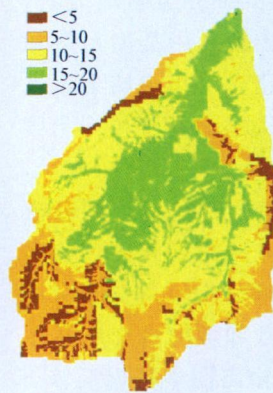


图7 5月份土壤水分含量

Fig.7 Soil moisture content in May 2008

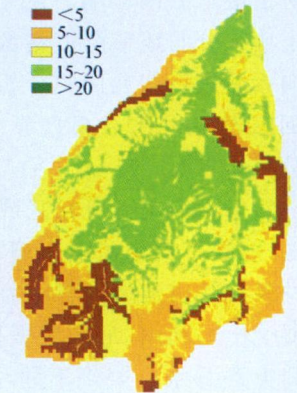


图8 6月份土壤水分含量

Fig.8 Soil moisture content in June 2008

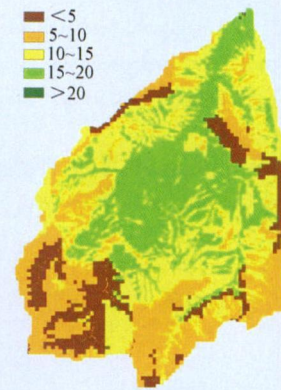


图9 7月份土壤水分含量

Fig.9 Soil moisture content in July 2008

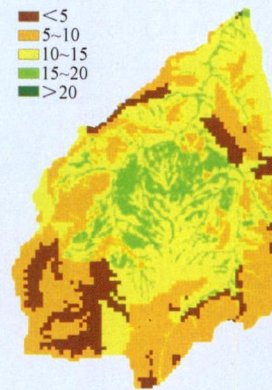


图10 8月份土壤水分含量

Fig.10 Soil moisture content in August 2008

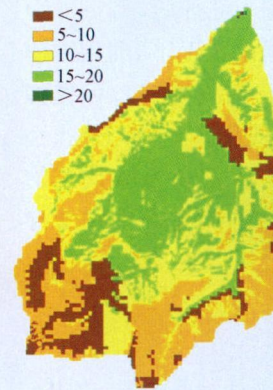


图11 9月份土壤水分含量

Fig.11 Soil moisture content in September 2008

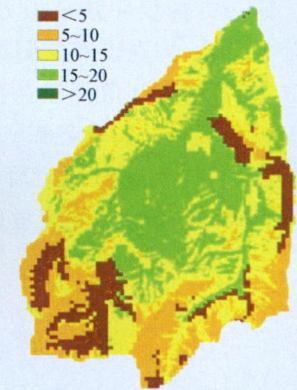


图12 10月份土壤水分含量

Fig.12 Soil moisture content in October 2008

从输出的图来看, 各月土壤水分空间格局分布主要受土地利用、地形湿度指数和坡向的影响; 在季节变化上, 各月土壤水分含量不同, 从 Arcmap 下各月属性表中可以看到 5-10 月份, 小流域土壤平均含水量分别为 11.8%, 11.6%, 11.1%, 10%, 11.1% 和 11.6%, 从输出图也可以反映出先下降后升高的

趋势, 8 月份最低。

### 3 讨论与结论

在已有研究中, 大都将土地利用<sup>[2, 11, 12]</sup>、坡向<sup>[13]</sup>等因子作为定性变量, 通过在不同的定性因子下进

行水分测定与对比分析,进而确定该类因子对土壤含水量的影响。这种处理方法推进了定性因子对土壤水分的影响研究,然而,关于将定性因子作为预测变量,建立土壤水分预测模型的研究相对较少。这在一定程度上受限于定性变量的处理方法。邱杨等<sup>[14]</sup>将定性变量转换为哑变量,建立了包含土地利用、地形等定性因子的多元回归模型。

本研究在实测数据的基础上,将定性因子土地利用类型、坡向经标准化处理得到土地利用类型系数和坡向系数,能够定量地表达土地利用类型和坡向对土壤水分的影响。运用多元回归分析的方法,对土壤水分与地形湿度指数、土地利用类型系数和坡向系数进行多元回归分析,建立了小流域土壤水分回归方程,回归效果显著。因此,可用于模拟土壤水分分布状况。

将模型应用于研究区域,借助 GIS 的空间分析方法,能够得到小流域土壤水分时空变化图。输出的结果反映出流域内各月的土壤水分空间分布格局主要受土地利用、地形湿度指数和坡向的影响。在时间上各月水分表现不同,从输出图中可以反映 5-10 月份,土壤水分表现为先下降,后升高,8 月份最低,这与实测数据的分析结果是一致的。王迪海<sup>[15]</sup>在该区的实地测定也表明,0~200 cm 深度的土壤含水量在 8 月份最低。

这一方面说明该模拟方法是可行的,另一方面也给予启示,即在没有实测数据的情况下,利用本研究方法,再引进气象因子(月降雨、气温等),可模拟小流域土壤水分的季节和空间变化。本研究是在小流域进行的,模拟时假定降雨、蒸发和土壤类型均一,而在较大流域尺度应考虑这些因子的空间变异

性,进而为较大流域土壤含水量的模拟提供支持。

## 参考文献

- [1] 王军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J].地理学报,2002,55(1):84-90
- [2] 张北赢,徐学选,白晓华.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):95-99
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 何福红,黄明斌,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
- [6] 焦锋.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].杨陵:西北农林科技,2006
- [7] 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].杨陵:中国科学院水利部水土保持研究所,2006
- [8] 张彩霞.基于 DEM 的地形湿度指数提取与应用研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2006
- [9] 王洪明,杨勤科,姚志宏.小流域尺度土壤水分与地形湿度指数的相关性分析[J].水土保持通报,2009,29(4):110-113
- [10] GB/T 21010-2007.土地利用现状分类[S].2007
- [11] 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
- [12] 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):225-227
- [13] 赫晓慧,温仲明.小流域地形因子影响下的土壤水分空间变异性研究[J].水土保持研究,2008,15(2):80-83
- [14] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatiotemporal prediction of soil moisture content using multiple linear regression in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2003, 54 (1-2): 173-195
- [15] 王迪海,赵忠,李剑.土壤水分对黄土高原主要造林树种细根面积季节动态的影响[J].植物生态学报,2010,34(7):819-82

(责任编辑 李美娟)