

小流域尺度土壤水分与地形湿度指数的相关性分析

王洪明¹, 杨勤科², 姚志宏²

(1. 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以陕北黄土高原为实验样区, 考虑到流向的计算方法会对计算地形湿度指数产生影响, 因而采用单流向算法和多流向算法计算得到地形湿度指数, 将地形湿度指数和实测土壤水分数据进行叠加, 据此分析土壤水分与地形湿度指数的相关性。同时对比分析单流向算法和多流向算法计算得到的地形湿度指数质量的优劣, 提出了利用地形湿度指数模拟土壤水分的最佳流向算法。

关键词: 地形湿度指数; 单流向算法; 多流向算法; 土壤水分

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2009)04-0110-04

中图分类号: S157, N945.1

Correlation of Soil Moisture and Topographic Wetness Index at a Scale of Small Watershed

WANG Hong-ming¹, YANG Qin-ke², YAO Zhi-hong²

(1. Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: By taking the Northern Shaanxi Loess Plateau as a study area, the topographic wetness index is calculated by using the single flow direction algorithm and multiple flow direction algorithm. In calculation, it is considered that the flow direction algorithm will have a significant impact on the result of topographic wetness index. The correlation of soil moisture and the topographic wetness index are analyzed based on the data which consist of sampled soil moisture data and topographic wetness index data. The quality of topographic wetness index data calculated by using the single flow direction algorithm and multiple flow direction algorithm are then compared. The best flow direction algorithm to soil moisture simulation is put forward.

Keywords: topographic wetness index; single flow direction algorithm; multiple flow direction algorithm; soil moisture

在黄土高原地区, 土壤水分是水分循环的重要环节, 土壤水分含量对于降水产流以及作物和植物生长具有重要意义。对于流域水文模型和区域土壤侵蚀模型而言, 准确估算土壤水分, 是径流模拟计算的基础。关于土壤水分的研究, 比较多的工作是在点尺度上, 针对具体土壤剖面来分析的^[1-6]; 当前, 研究者针对小流域治理对土壤水分的影响的实践要求, 进行了小流域尺度土壤水分的整体行为的研究^[7-13]。并随着 GIS 和 DEM 等空间数据的应用, 开始着眼地块并分析小流域土壤水分空间变异特征。相关研究概括为 3 个方面: 一是利用制图学方法, 将土壤水分与坡度和土地利用方式建立关系, 进而完成小流域乃至县域土壤水分的制图研究^[14-15]。二是充分考虑土壤水分的影响因素, 在实测资料基础上, 利用 GIS 空间分析建模方法, 完成对区域尺度土壤水分的评价与制图

分析^[16]。三是引入地形湿度指数^[17], 并与实测数据进行相关分析, 进而完成小流域尺度土壤水分制图分析^[18]。

上述第一种方法, 对于影响土壤水分的环境因子考虑不够, 因而制图过程及其结果尚显粗糙。第二种方法充分考虑了多种影响因子, 能比较有效的描述每个栅格单元在各个层次的土壤水分含量变化, 但是缺少对土壤水分形成机理的分析。第三种方法比较充分地考虑了各种影响因素, 也考虑了土壤水分形成的机理, 但已有研究受到实测数据的限制, 因而尚待改进和完善。可见, 分析和建立土壤水分与地形湿度指数关系, 是实现土壤水分及其空间变异性模拟分析的关键。

为了进一步量化地形湿度指数与土壤含水量的空间分布, 本研究在总结分析前期研究基础上^[14-17],

收稿日期: 2008-10-21

修回日期: 2009-03-11

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB407203)

作者简介: 王洪明(1981—), 男(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 的应用。E-mail: wanghongming2777@126.com。

通信作者: 杨勤科(1962—), 男(汉族), 陕西省陇县人, 博士, 研究员, 主要从事区域水土流失与 GIS 应用研究。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn。

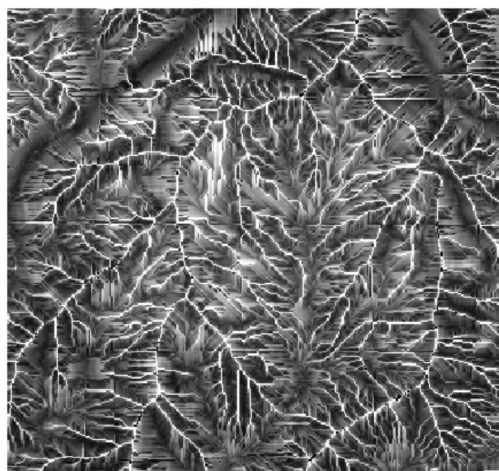
将系统的实测数据与高精度 DEM 基础上提取的地形湿度指数结合,运用线性回归的方法,进行小流域尺度土壤水分与地形湿度指数的相关性分析,力图建立小流域土壤水分模型,为区域土壤侵蚀模型中径流估算提供支持。

1 数据基础与研究方法

1.1 研究区概况与土壤水分测定

研究区域为陕西省安塞县沿河湾乡桑塌村。该地区位于黄土高原中部,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。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。同时该地区又处于黄土高原丘陵沟壑区,地形起伏很大,是分析地形对土壤水分的影响典型区域。

土壤水分测定时间为 2008 年 5 月、6 月、7 月的中下旬,采样区的面积约为 2.7 km^2 ,在研究区的南、北、东、西部,按照不同土地利用类型,不同坡度分级进行土壤水分取样。为了进行动态监测,5 月、6 月、7 月测定样点相同,样点数目为 20 个。每个采样点取样深度为 5 m,样品间距为 20 cm。土壤水分采用烘干法(105)测定。



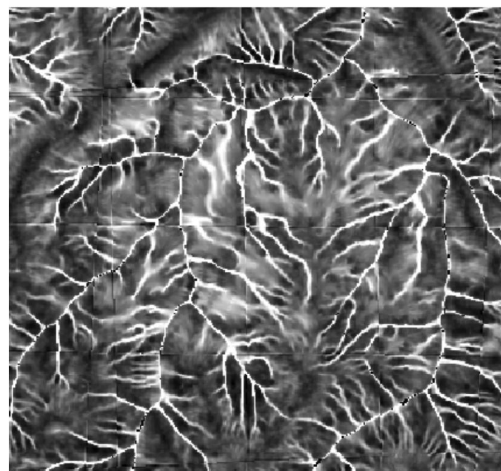
单流向算法提取得到的地形湿度指数

1.2 地形湿度指数的提取

地形湿度指数的计算利用了前期研究所建立的 DEM^[19],水平分辨率为 5 m。地形湿度指数的计算公式为: $w = \ln(A / \tan \alpha)$,式中: w ——地形湿度指数; A ——单位等高线长度或单元栅格的汇流面积; α ——局部坡度角。在地形湿度指数的计算方法上,本研究采用常用的单流向算法和多流向算法^[20-22]。无论哪种算法,要计算栅格 DEM 中网格的地形湿度指数,均要计算网格的 A 和 $\tan \alpha$ 。 A 的计算采用公式 $A = A_i / L_i$ 计算,式中: A_i ——网格的总上坡汇水面积; L_i ——网格周围入流方向上的有效等高线长度。 $\tan \alpha$ 的计算则与具体算法有关。利用已经经过填洼处理的该地区的栅格 DEM,参考单一流向算法和多流向算法的基本思路,使用 Visual Basic 6.0 编写了计算地形指数的单一流向算法和多流向算法程序,计算得到地形湿度指数图(图 1),同时统计出相应的地形湿度指数分布特征值(表 1)。

表 1 不同流向算法提取地形湿度指数特征值

地形湿度指数特征值	最小值	最大值	平均值	标准偏差
单流向算法	0.51	17.28	4.20	1.76
多流向算法	0.33	17.10	4.25	1.71



多流向算法提取得到的地形湿度指数

图 1 不同流向算法提取地形湿度指数图

1.3 相关分析方法

为了验证实测样点的土壤水分与地形湿度指数的关系,本研究分别将 5 月份、6 月份、7 月份的样点分布图(由于每个月选取样点相同,所以这 3 个月的样点位置相同,不同的是土壤含水量属性值)和两种方法计算得到的地形湿度指数图相叠加,将每个样点的土壤水分数据和在地形湿度指数图上对应的地形湿度指数值录入到 Excel 表格中。每个样点的土壤

水分数据分别选取 0—1 m,0—2 m,0—3 m,0—4 m 和 0—5 m 土壤含水量的平均值。以样点的土壤含水量作为因变量,以样点所对应的地形湿度指数作为自变量,进行线性回归。

土壤水分与地形湿度指数的相关程度用相关系数来判定。相关系数是对变量之间关系密切程度的度量,相关系数用 r 表示, r 的取值范围是 $[-1, 1]$, $|r|$ 越趋于 1,表示关系越密切; $|r|$ 越趋于 0,表示关

系越不密切。把每次线性回归得到的相关系数进行统计,得到的统计结果如表 2 所示。最后利用统计结

果表生成 5 月份、6 月份、7 月份土壤水分与地形湿度指数的关系图(图 2)。

表 2 土壤水分与地形湿度指数的相关系数的统计结果表

土壤水分平均值 取样深度/m	5 月份相关系数		6 月份相关系数		7 月份相关系数	
	单流向	多流向	单流向	多流向	单流向	多流向
0—1	0.45	0.43	0.36	0.41	0.34	0.38
0—2	0.48	0.48	0.40	0.42	0.44	0.43
0—3	0.53	0.53	0.45	0.45	0.49	0.47
0—4	0.54	0.53	0.51	0.50	0.50	0.49
0—5	0.56	0.55	0.54	0.53	0.51	0.49

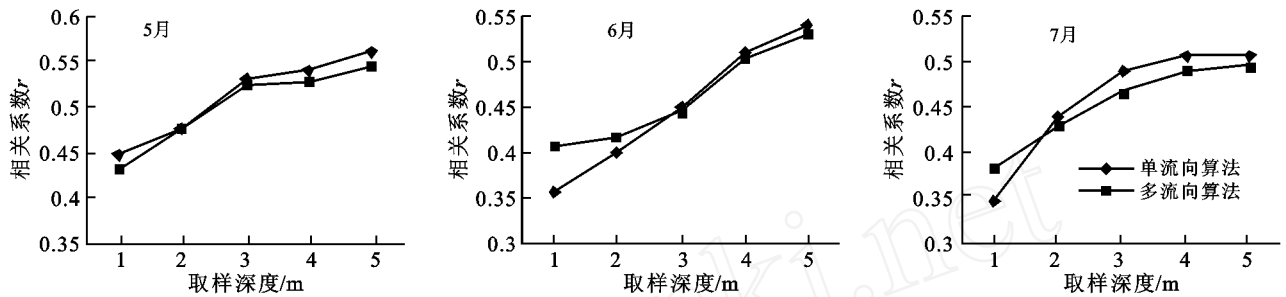


图 2 5—7 月份土壤水分与地形湿度指数关系

2 结果与分析

2.1 地形湿度指数及其分布

从图 1 可以看出,多流向算法提取得到的地形湿度指数更加平滑,这主要是由于多流向算法认为水流分布具有分散性,即水流方向具有不确定性,可能同时流向 8 个邻域格网中某几个邻域格网。这种假设比单流向假设更接近现实中的水流流向。从表 2 可以看出,采用单流向算法计算出的地形湿度指数在最小值、最大值、标准偏差上均大于采用多流向算法计算出的地形指数的相应特征值。而采用多流向算法计算出的地形指数的标准偏差小于采用单流向算法的标准偏差,说明采用多流向算法计算出的地形湿度指数的数据精度高于单流向算法。

2.2 土壤水分与地形湿度指数关系

从图 2 和表 2 可以看出,5 月份、6 月份、7 月份的土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 的取值范围从 0.34 到 0.56,说明二者的相关程度处于低度相关和中度相关的范围。相关性较低的原因之一在于土壤水分的分布还受到坡向和土地利用方式等因素的影响^[18],而湿度指数仅仅考虑到了坡面水分汇集与累积作用。

由表 2 还可以看出,随着土壤水分取样深度的增加,累计深度范围内土壤水分与地形湿度指数关系趋向增加。5 月份、6 月份、7 月份土壤水分与基于单流

向/多流向地形湿度指数的相关系数分别由 0.45/0.43 到 0.56/0.55,0.36/0.41 到 0.54/0.53、0.34/0.38 到 0.51/0.49。

从图 2 和表 2 还可看出,5 月、6 月、7 月,土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 依次略有减少。以多流向算法为例,在土壤水分取样深度为 1 m 的情况下,5 月、6 月、7 月土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 分别为 0.43、0.41、0.38;在土壤水分取样深度为 5 m 的情况下,5 月、6 月、7 月土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 分别为 0.55、0.53、0.49。

2.3 湿度指数算法对关系的影响

单流向算法和多流向算法计算得到的相关系数差别不是很大,而且变化趋势也相同。不同之处在于多流向算法计算得到的相关系数变化范围小,6 月份得到的土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 变化范围是从 0.41 到 0.53,7 月份得到的土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 变化范围是从 0.38 到 0.49。而单流向算法计算得到的相关系数 r 变化范围要高于多流向算法,6 月份得到的土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 变化范围是从 0.36 到 0.54,7 月份得到的土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 变化范围是从 0.34 到 0.51。

3 结论与讨论

(1) 小流域尺度上,土壤水分与地形湿度指数具

有一定的相关性,二者的相关程度可以达到中度相关。

(2) 随着土壤水分取样深度的增加,土壤水分与地形湿度指数的相关系数增大,而越靠近地表,相关性越低。这主要是由于靠近地表的土壤水分受到包括土地利用方式(影响地表蒸散发能力)、坡向(日照时间长短不同,接受太阳辐射量不同)、坡度(地表水流速度不同,接受太阳辐射的量也不同)、坡位(主要是物质累计量不同)等环境要素的影响较大,相对地形因素的作用减弱,相关性降低。

(3) 单流向算法和多流向算法计算得到的相关系数差别不是很大,但多流向算法计算得到的地形湿度指数与土壤水分的相关性的稳定性较高。尤其是对于靠近地表的取样深度范围,多流向算法计算得到的相关系数要优于单流向。

(4) 土壤水分与地形湿度指数的相关关系并没有达到显著,可见小流域尺度土壤水分的模拟,须引入其它的环境变量,对地形湿度指数进行修正。

(5) 研究期(5月、6月、7月)土壤水分与地形湿度指数的相关系数 r 依次略有减少。很可能是由于从5月到7月,随着降雨、辐射、蒸发等其他因素对土壤水分的影响增加,相对地形因素的作用减弱,相关性降低,但由于这些因素对土壤水分的作用大小很难进行评价,需要进一步的研究;另外,由于受基础数据源的限制,在其它地形区,不同比例尺和更大流域上,土壤水分与地形湿度指数是否仍具有同样程度的相关性,还有待进一步的研究;本研究中土壤水分与地形湿度指数的相关关系并没有达到显著,这是由于利用地形湿度指数来模拟土壤水分的空间分布需要引入其它的环境变量才能进行。因此,研究其它的环境变量与土壤水分的关系成为亟待解决的问题。

致谢: 本研究工作在野外采样过程中,中国科学院安塞站提供了实验场地和样品处理条件;中国科学院水土保持研究所博士生姚志宏,西北大学硕士生李京忠,蔡清华,白天路,牛亮等参加了野外采样工作并提出了宝贵意见,特此致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 李玉山,喻宝屏. 土壤深层贮水对小麦产量效应研究[J]. 土壤学报, 1980, 17(1): 43-53.
- [2] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [3] 西北水保所土壤水分组. 陕西省东旱塬农田墒情调查[J]. 土壤, 1957(6): 279-285.
- [4] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
- [5] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [6] 黄明斌,杨新民,李玉山. 黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 113-116.
- [7] 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.
- [8] 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[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 428-438.
- [9] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 741-747.
- [10] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 30-36.
- [14] 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]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- [15] 焦峰,温仲明,陈云明,等. 基于 GIS 的安塞县土壤水分制图及其数量分析[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 75-80.
- [16] 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.
- [17] 张彩霞,杨勤科,李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 115-123.
- [18] 张彩霞. 基于 DEM 的地形湿度指数提取与应用研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- [19] 张彩霞,杨勤科,段建军. 高分辨率数字高程模型构建方法[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1009-1014.
- [20] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [21] 张镛光,王克林,陈洪松,等. 基于 DEM 的地形指数提取方法及应用[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 715-719.
- [22] 解河海,黄国如. 地形指数若干计算方法探讨[J]. 河海大学学报, 2006, 34(1): 46-50.