

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.004

湿润地区坡面土壤含水率时空变异性研究

刘宏伟^{1,2}, 高 菲³, 余钟波⁴, 高风华^{4,5}, 向 龙⁴

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
5. 南京工程学院环境工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:通过野外观测数据分析,研究湿润地区坡面尺度土壤含水率的时空变异性。利用频域反射(FDR)传感器在1年内以1次/h的观测密度连续监测近地表24个位置及2个剖面上12个位置的土壤含水率。利用变异系数和半方差图方法,分析了研究区域内不同空间位置上土壤含水率的时间变异性 and 不同季节土壤含水率的空间变异性。结果表明,在太湖流域地表附近土壤含水率呈中等或者中等偏弱变异性;土壤性质、地形、植被、气象和人类活动等因素影响了土壤水分的时空变异性;不同要素在时间变异性 and 空间变异性上影响力不同,并且不同季节有不同的主导影响因素;不同季节土壤含水率半方差具有相似的模式,这与各因素作用的强弱有关。

关键词:土壤含水率;时空变异性;变异系数;半方差图;湿润地区;坡面

中图分类号:P33 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0017-07

Study on temporal-spatial variability of soil moisture content on hillslope in a humid area

LIU Hongwei^{1,2}, GAO Fei³, YU Zhongbo⁴, GAO Fenghua^{4,5}, XIANG Long⁴

(1. *Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*
2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*
3. *Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;*
4. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
5. *School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China*)

Abstract: The temporal-spatial variability of soil moisture content on a hillslope in a humid area was analyzed based on field monitoring data. Hourly data over a year were collected with frequency domain reflectometry (FDR) sensors. Twenty-four sensors near the soil surface and 12 sensors in two profiles were set up to monitor the soil moisture content continuously. The coefficient of variation and semi-variogram were used to analyze the soil moisture content's temporal variability in different locations and the spatial variability in different seasons in the study area. The results show that, in the Taihu Basin, the surface soil moisture content exhibited a medium or low level of variability. Soil characteristics, topography, vegetation, meteorological factors, and human activities influenced the temporal-spatial variability of soil moisture. These factors had different effects on the temporal-spatial variability, and the dominant factors were different in each of the four seasons. The semi-variograms for the soil moisture contents in different seasons had similar patterns due to different effects of the factors.

Key words: soil moisture content; temporal-spatial variability; coefficient of variation; semi-variogram; humid area; hillslope

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51209139)
作者简介:刘宏伟(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事水文实验、模拟以及防洪减灾等研究。E-mail: hwliu@nhri.cn

土壤水运动是水文循环中最重要的组成部分,土壤水分分布与运动规律的研究是水资源利用和环境整治的主要研究内容之一。土壤水分运动与下渗过程、蒸散发过程以及地下水分运动过程联系紧密^[1-3],并对地表与地下径流形成、溶质迁移、土壤-大气之间相互作用等各环节都有着显著的影响^[2-7]。土壤水分不论在空间上还是时间上,都有着很强的变异性^[8-9]。土壤水分变异性的存在增加了水文过程及溶质迁移过程研究的复杂程度。

土壤含水率在水文过程和溶质迁移中具有重要作用,近年来关于土壤水分国内外学者都进行了大量研究。胡伟等^[7]在黄土高原退耕坡地地区研究了土壤水分空间变异性及尺度影响,发现不同研究尺度上影响土壤含水率的主导因素和过程是不同的。Andrew 等^[8]研究了澳大利亚小流域中土壤含水率的空间相关性及其与流域水文过程的关系,认为流域上土壤含水率在空间和时间上均有相关关系并受地形影响明显。汪星等^[10]在黄土高原半干旱区开展了山地密植枣林土壤水分特性研究,分析了该区域土壤水月变化规律及其与植被的关系。王云强等^[11]研究了黄土高原区域尺度上土壤水分空间变异性规律,分析了变异系数和空间异质比在 0~500 cm 垂向分布的规律性。一些学者^[9, 12-14]比较了黄土区草地和农地两种土地利用类型条件下土壤含水率变异性,认为土地利用方式对水平和垂向含水率分布有明显影响。Lin 等^[15-16]在美国宾州的研究显示,对土壤含水率空间变化和时间变化的研究有助于了解降雨发生时流域地表径流的发生机制和地下优势流的产生现象,对准确模拟和预测径流过程十分重要。

从根本上影响土壤水变化的因素在时间和空间上是同时变化的,因此研究土壤水分变化特性必须同时从时空两方面入手。目前国内此类研究多见于对黄土高原半干旱区的研究,鲜有对湿润地区土壤含水率方面探讨。本文选取太湖流域西部宜兴梅林小流域观测数据,比较不同季节土壤含水率的时间和空间变化,掌握太湖流域湿润地区土壤水变化规律和主要影响因素,以帮助加深对湿润地区产流、产污机制的理解。通过探求湿润地区土壤含水率时空变异性规律和影响因素,为研究各因素如何定量影响水文循环过程打好基础,进而为流域水文、溶质模拟以及非点源污染迁移规律的研究和分布式水文、溶质模拟的改进提供科学依据。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域概况

研究区域梅林小流域地处宜兴市东南(31°20′

N, 119°51′E),面积约 0.7 km²,位于太湖以西约 9 km 处,属于封闭型小流域(图 1)。多年平均降雨量约 1 150 mm,平均气温 15.5℃。土地利用类型主要有菜地、旱地、板栗林、竹林、茶园、梨园和水稻田等。流域内主要土壤类型为红壤和黄棕壤,并存在少量白土。土壤水分长期观测设备设置在流域内一处山坡上,坡度约 19°,高程变化在 15.5~23.8 m 之间(图 2)。观测场处于流域内靠近上游东向山坡的下部,坡面以下处有水塘,常年积水。坡面种植板栗树,植被覆盖率高,根系生长到地面下 0.5 m 以上。夏季地面有杂草生长。试验区坡长 18 m,面积 81 m²。土壤粒径组成及其他特性见表 1。在坡顶、中段及坡脚分树下和树间分别取 3 个样品(表 1)。

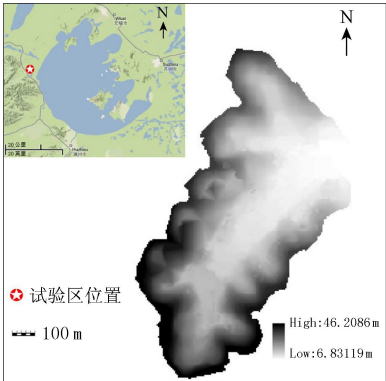


图 1 梅林流域位置

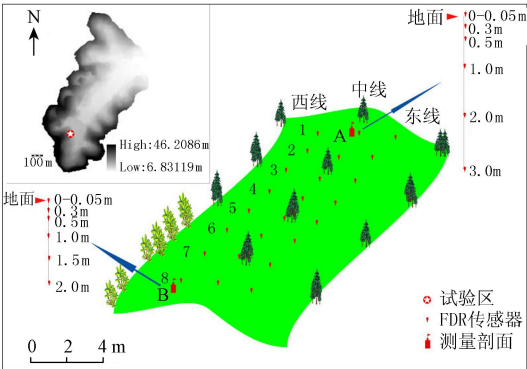


图 2 土壤水传感器平面和剖面布置

表 1 研究区域土壤特性平均值

试验区 土壤取样 位置	不同土壤质地比例/%			干容重/ (g·cm ⁻³)	饱和水力 传导度/ (cm·d ⁻¹)
	D< 0.002 mm	0.002 mm≤ D≤0.05 mm	D> 0.05 mm		
坡顶	10.9	67.0	22.1	1.32	46.0
坡中	13.2	69.3	17.6	1.37	31.9
坡脚	12.9	70.1	17.1	1.34	37.5

注:D 为土壤颗粒直径。

1.2 观测布置和分析方法

1.2.1 野外观测及试验方法

在选定的试验区中,布置有 34 个频域反射(FDR)土壤水分传感器,其中,地表传感器布置在沿山坡东线、中线和西线,分布在 8 个不同高度,同

一高度 3 个传感器间距 1.5 m(如图 2 中“FDR 传感器”);剖面传感器布置在 A、B 两个垂向剖面中(如图 2“测量剖面”),布置深度见图 2,具体为 A 剖面传感器深度为地表、地表以下 0.3 m、0.5 m、2.0 m 和 3.0 m 5 个传感器,B 剖面传感器深度为地表、地表以下 0.3 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m 和 2.0 m。试验场坡面地形中线位于坡脊,西、东两线位于坡沟。坡脊上种有板栗树,坡沟主要是树间空地。土壤水观测每 1h 测量 1 次电压(单位 mV)数据,根据率定的“电压-体积含水率曲线”换算体积土壤含水率。分析采用的数据从 2006 年 11 月 16 日到 2007 年 11 月 7 日,利用数据采集器逐小时记录数据。土壤机械组成采用 LS13320 全自动流光粒度分析仪测定,土壤容重采用环刀法测定,土粒密度采用比重瓶法测定^[17]。雨量观测使用翻斗式雨量计观测。

1.2.2 分析方法

利用不同季节土壤含水率变异系数和半方差图来分析土壤含水率的时间变异性,以及不同季节的空间变异性,比较各种因素对土壤含水率变异性的影响^[18-19]。在分析土壤含水率观测值不同空间位置的时间变异性 and 不同时间的空间变异性时,参考了变异系数 C_v ^[20]。当 $C_v \leq 0.1$ 时为弱变异性,当 $0.1 < C_v \leq 1$ 时为中等变异性^[7, 12]。

半方差图法是用来比较土壤水分的空间连续特性和区域变异特性的。假定土壤属性在空间上二阶平稳,用半方差函数来表示其空间相关结构。半方差常采用式(1)计算:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [\theta(x_i) - \theta(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: h 为位差; $N(h)$ 为位差为 h 时的样本对的数量; $\theta(x_i)$ 为 x_i 位置的土壤含水率; n 为样本数量。半方差图中半方差值随步长增加到一个相对稳定的水平上时,对应的半方差值称为基台值,这是区域化变量总体特征的体现。变程是指变异函数在有限步长上达到基台值时对应的步长,也称自相关距离,是空间自相关性的最大距离。本文中半方差的计算使用地学统计程序库 (geostatistical software library, GSLIB)^[19],分别从总体变异性、土壤特性影响、地形影响、植被影响、气象因素影响等方面进行分析。

2 结 果

2.1 地表附近土壤含水率变异性

2.1.1 沿坡长方向不同位置土壤含水率时间变异性

对沿坡长 8 个不同高度的平均土壤含水率时间序列进行分析(图 3,表 2,其中 1~8 位置为图 2 中所标注的不同高度),其变异系数均在 0.20~0.26

之间,变异性属中等偏弱。沿坡长方向,体积含水率年平均值总体趋势为上部较小,下部较大,而实测数据的时间序列变异系数则变化不大。坡顶和坡长中段 6 号位置的变异系数略高于其他位置的测量值,其时间变异性略强于其他位置。

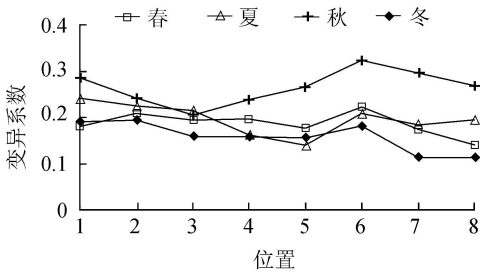


图 3 不同季节坡面含水率时间序列变异系数

表 2 坡长方向土壤含水率时间序列统计结果

沿坡位置	$\bar{x}/\%$	σ_x	C_v
1	24.81	5.92	0.24
2	29.60	6.65	0.22
3	31.48	6.24	0.20
4	35.58	7.15	0.20
5	35.08	7.28	0.21
6	32.51	8.33	0.26
7	30.47	6.79	0.22
8	31.46	6.36	0.20

2.1.2 垂直坡长方向土壤含水率时间变异性

表 3 为 3 条沿线上平均土壤含水率时间序列变异系数等统计数据。中线的土壤含水率平均值高于西东两线,而最小值低于左右两边。3 条测线土壤含水率的最大值非常接近。时间序列的变异系数显示,3 条线土壤含水率平均值均为中等偏弱变异性,中线变异性相对东西线较强。中线的全年土壤含水率平均值和最小值较低,变异系数较大,与东西两线相比,体现出明显的坡脊与坡沟土壤含水率变化的差异。根据表 4 不同季节的统计结果来看,冬春夏 3 季的土壤含水率时间变异系数依次略有升高,差别不太大,而秋季则有明显上升,土壤含水率平均值则有与之相应的相反结果。

表 3 垂直坡长土壤含水率时间序列统计结果

测线	$\bar{x}/\%$	$x_{\max}/\%$	$x_{\min}/\%$	σ_x^2	σ_x	C_v
西线	33.4	48.7	16.2	40.29	6.35	0.19
中线	28.6	48.3	13.3	48.64	6.97	0.24
东线	31.4	48.8	15.1	44.17	6.65	0.21

表 4 垂直坡长土壤含水率季节序列统计结果

测线	11—1 月		2—4 月		5—7 月		8—10 月	
	$\bar{x}/\%$	C_v	$\bar{x}/\%$	C_v	$\bar{x}/\%$	C_v	$\bar{x}/\%$	C_v
西线	37.0	0.13	34.7	0.16	34.3	0.16	29.6	0.24
中线	30.3	0.20	29.4	0.21	28.0	0.22	27.5	0.32
东线	34.7	0.17	31.4	0.19	32.3	0.20	28.9	0.25

2.1.3 不同季节地表土壤含水率空间变异性

从不同季节平均土壤含水率在空间上的变异性来看,多属于中等或者中等偏弱的变异性。坡面上3条测线沿坡长方向的空间变异系数较小,其中西线与东线变异性小于中线(图4(b))。不同高度上垂直坡长方向的土壤含水率的空间变异性高低相间,呈波浪型变化(图4(a)),并且坡顶和坡脚两处垂直坡向的变异系数高于中间各个高度。从不同季节的空间变异性来看,春、夏、秋3季的变化规律相似,并且与冬季空间变异系数相比变化略大。

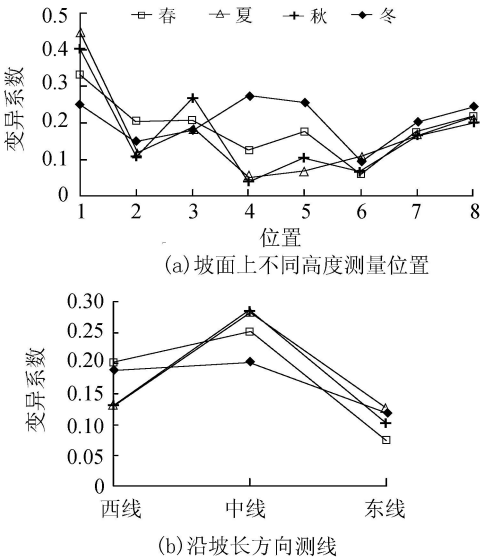


图4 不同季节土壤含水率变异系数

根据沿坡长方向半方差计算结果,可以发现春、夏、秋3个季节的半方差图模式相似,可以用球状模型拟合,冬季的变程明显大于其他3个季节,用高斯模型可以很好拟合(图5)。春、夏、秋3季半方差变

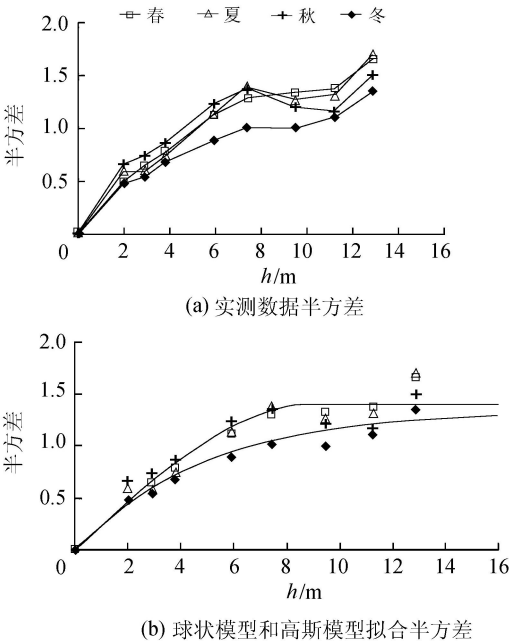


图5 不同季节土壤含水率半方差拟合

程约为8 m,而冬季的半方差在16 m 以内都没有达到基台值。这说明在春、夏、秋季沿坡长方向土壤含水率的相关距离要小于冬季。

2.2 垂向剖面土壤含水率变异性

2.2.1 垂直剖面土壤含水率时间序列变异性

沿垂直方向的土壤含水率时间变异性从浅到深有明显的从大到小的变化趋势(图6)。地表土壤含水率的时间变异性为中等,而较深的土壤变异性逐渐减弱,逐渐变成弱变异性。变异系数沿深度变化存在转折点,位于0.5 ~ 1.0 m 深度。这种趋势的分布与降水、蒸发、植被生长和根系深度、地下水运动有着密切的关系。

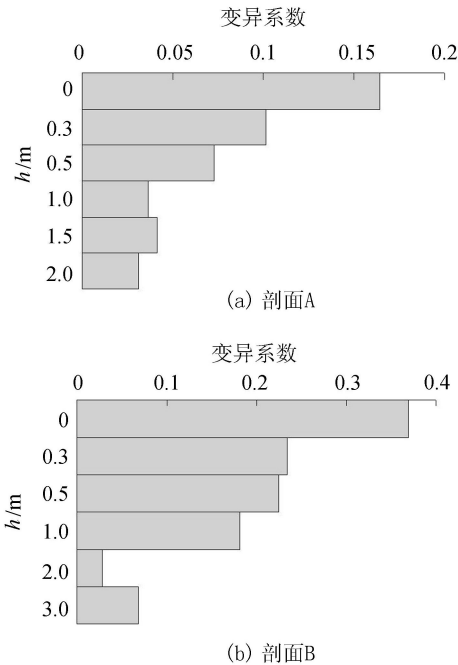


图6 A、B剖面土壤含水率时间序列变异系数

2.2.2 不同季节垂向剖面土壤含水率空间变异性

从不同季节土壤含水率垂向剖面分布情况来看,可以将剖面分成3个部分(图7)。第一部分为近地表层,包括A剖面的地表到0.5 m 深度和B剖面上从地表到1.5 m 与2.0 m 之间。这部分土壤含水率在不同季节变化明显,受前面分析的各个因素影响明显。第二部分为稳定层,包括A剖面0.5 ~ 1.5 m 之间和B剖面2.0 ~ 3.0 m 之间。这部分土壤含水率时间变化非常小,对地表水和地下水变化响应均不明显。第三部分为近潜水层,包括A剖面2.0 m 上下,B剖面3.0 m 上下。这部分受变动地下潜水位的影响,当潜水位在这个层间随时间变动时会造成土壤含水率的变化。A剖面位于坡脚,而B剖面位于坡顶。与坡脚剖面相比,坡顶剖面含水率变异性明显较强。

—■— 春季 —▲— 夏季 —■— 秋季 —●— 冬季

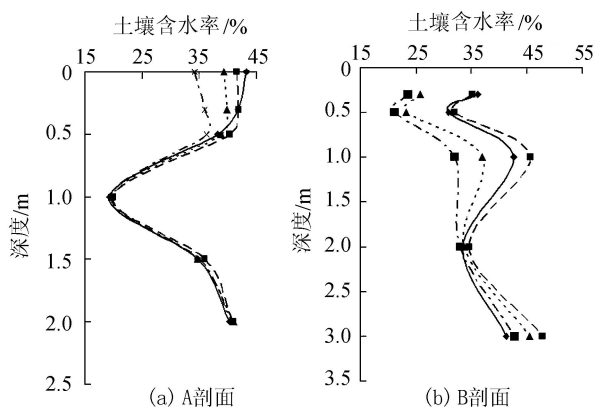


图7 季节平均土壤含水率沿垂向分布

3 讨论

湿润丘陵地区土壤含水率不论在时间还是空间上均有中等或者中等偏弱的变异性。不同空间位置上的时间变异系数和不同时间段的空间平均土壤含水率变异系数,多数情况下在 0.13 ~ 0.26 之间,少数情况出现高于 0.4 或者低于 0.1。

3.1 地表土壤水时间和空间变异性的影响因素

从土壤特性影响方面来看,坡顶土壤含沙量高(表1),平均饱和和水力传导度较高,透水性好于其他位置,在土壤含水率时间变化过程中,坡顶吸收和释放大快,因此坡顶含水率的时间变异性与其他位置相比略大。在相同高度的坡面上,树下和树间空地的土壤性质略有差别^[21],但总体差别不大。实测数据反映出3条测线上的饱和土壤含水率非常相似(表3),土壤特性对垂直坡长方向上土壤含水率的变异性影响不大。

从地形影响方面来看,降雨发生以后,坡顶水分在重力作用下将会向坡脚方向汇集,使得坡面上部土壤水分时间序列变异系数略高于中下部。位于西线和东线沿坡长方向的空间变异系数明显小于中线(图4(b))。这样的现象首先是由于实验区局部微地形的影响,西东两线位于坡沟,中线位于坡脊。相比之下,坡脊排水容易,而坡沟则更有利保持水分,所以坡脊土壤水分变化相比之下更剧烈。

从季节和天气影响方面来看,研究区域全年都有降水分布,在夏季最为集中。从不同季节的时间系列变异系数来看,冬季变异性最弱,因为降雨和蒸发量都较小。8—10月的秋季气温高,蒸发与植物散发量大,土壤含水率均值显然低于其他3季,3个月观测值的时间变异性也明显高于其他3季,这主要受气象因素影响。夏季坡面不同高度测量值的时间变异系数差别较大,总体呈上高下低。造成这种

现象,主要是因为夏季长时间降雨,下部测点很长时间处于接近饱和或者田间持水量的状态,坡上处于这种状态的时间则短得多,因此其时间变异性会小于坡面上部的位置。即降水发生多的时段,坡顶土壤含水率变异性最大;雨期结束后,坡顶变异性逐渐接近坡脚的状态。Famiglietti 等^[22]在沿坡长方向7个月的采样分析也得出类似的观测结果。

植被的影响在坡面不同高度上垂直坡长方向的空间变异性也有明显的体现。如图4(a)所示,变异系数呈波浪形变化,有板栗树生长的高度垂直坡长方向的空间变异性较强,无植被生长的高度位置则较弱。中线测量传感器沿坡面是按树下一树间—树下一树间隔布置,变异系数波浪形变化规律与之相应。图4(b)显示夏季中线变异性最强,春秋次之,冬季最弱,这与植物生长的影响关系密切。植被生长会导致土壤持水能力和蒸散发能力发生变化,从而导致土壤含水率变异性较强。

此外,人类活动也对土壤水的变化有着明显的影响。坡面上6号位置测值的时间序列变异系数明显高于周围(表2),主要原因是测区的人类活动造成扰动,导致变异性增强。

与冬季相比,春、夏、秋3季降雨多且频繁,植被生长也较旺盛,因此植被、气象因素的影响强于地形因素引起的土壤水分沿山坡再分布的作用,而冬季这种土壤水分再分布的运动影响明显得多。土壤水分再分布作用联系着坡面上很长距离上的土壤含水率。冬季其他因素影响减弱,使这种再分布作用成为主要影响因素之一,从而造成不同时间段沿坡面方向土壤含水率相关距离,冬季大于其他季节的现象。因此,从不同季节土壤含水率变化模式可以识别出植被、气象、地形等不同影响因素的不同作用效果。若要进一步弄清各影响因素的作用机理和定量规律,则有必要开展更加可控的针对性实验。

3.2 垂直剖面土壤含水率变异性

首先,越上层的土壤接受降水补给相对越容易,土壤水分对降水的响应越明显,造成土壤水分时间序列变化剧烈。其次,在无雨期越接近地表的土层受太阳辐射、气温等气象因素影响越大,地表的蒸发过程与深层土壤相比也更为活跃,这造成土壤含水率变异性增大。第三,植被根系的生长影响较大,A剖面位于坡脚的树间区,地表植被为较矮小的杂草和茶树,其根系生长深度一般为 0.3 ~ 0.5 m。在这个范围之内,植物生长对土壤水分影响明显,根系对水分的吸收造成了 0 ~ 0.5 m 一段内土壤水分的较强变异性。B剖面布置的位置为板栗树附近。板栗树的根系比杂草和茶树深得多,所以从图6(b)可以

发现,土壤含水率变异性较高的区域比 A 剖面(图 6(a))要深一些。由于试验区位于湿润地区,地下潜水埋深很浅,所以观测剖面均受到变动地下水位的影响。从图 6 可以发现,A、B 两剖面最深处都有变异性反而增加的现象,A 剖面为 1.5 m,B 剖面为 3.0 m。这一现象主要是因为部分丰水时间里,潜水面达到测点以上,而缺水时间里,潜水面则退下去,这样就造成了土壤含水率时间的变动性有所增加。

4 结 论

a. 湿润丘陵地区土壤含水率不论在时间还是空间上均有中等或者中等偏弱的变异性。时间变异性总体趋势为冬季变异性最弱,春、夏季比冬季强,秋季最强。空间变异性总体趋势为坡顶变异性强于坡脚;坡脊变异性强于坡沟;垂直剖面上,地表层和受变动地下水位影响大的深层,土壤含水率变异性强于中等深度土层。

b. 土壤含水率变化受到土壤特性、地形、植被、气象和人类活动等因素的影响明显。各个影响因子在不同时间和空间条件有着不同的影响强度。在小尺度的山坡试验区上,不同空间位置不同的土壤特性主要影响各空间位置上土壤含水率在时间上的变异性。地形因素对沿坡长、垂直坡长和剖面 3 个维度均有影响。主要由于细节地形的差异影响汇流路径和土壤水分再分布的方式影响土壤水分变异性。植被生长在不同季节有不同的影响,春、夏、秋强,冬季弱。同时,植被生长旺盛的位置土壤水分变异性越强。气象因素包括降雨、蒸发等,是土壤含水率变化的最主要的驱动因素。雨多、气温高、植被生长旺盛的时间段气象因素影响最强烈。人类活动对地表土壤含水率的影响十分明显并且随机性强。

c. 沿坡长方向地表土壤含水率的空间变异性按不同时间段有不同的变异模式。当植被、气候等外部因素影响较显著时,土壤含水率半方差具有相似的模式,如试验采样期内的春、夏、秋季半方差图十分相似,都具有相似的基台值和变程。当外部因素影响不显著,地形等因素引起的土壤水分再分布占主要影响地位时,则会出现另一种模式,冬季的半方差图变程超过 16.0 m,变异性强于其他季节。

参考文献:

[1] IGNACIO R I, GREGOR K. V, RICCARDO R. On the spatial organization of soil moisture fields [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22 (20) : 2757-2760.
[2] YU Z, CARLSON T N, BARRON E J, et al. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin [J]. Water Resources

Research, 2001, 34 : 1313-1326.
[3] DONG W, YU Z, WEBER D. Simulation on soil water variation in arid regions [J]. Journal of Hydrology, 2003, 275 : 162-181
[4] ANDREW W, WESTERN, ZHOU Senlin, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. Journal of Hydrology, 2004, 286 : 113-134.
[5] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究 [J]. 水利学报, 2009, 40 (7) : 822-829. (LIU Hongwei, YU Zhongbo, CUI Guangbo. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (7) : 822-829. (in Chinese))
[6] 刘宏伟, 余钟波. 用 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 法计算 ET_0 : 以太湖流域的应用为例 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (1) : 6-8. (LIU Hongwei, YU Zhongbo. Application of Hargreaves and Penman-Monteith Equation to estimating ET_0 : a case study in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (1) : 6-8. (in Chinese))
[7] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕土壤水分空间变异性研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17 (1) : 74-81. (HU Wei, SHAO Ming' an, WANG Quanjie. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (1) : 74-81. (in Chinese))
[8] ANDREW W, RODGER B G, GUNTER B, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices [J]. Water Resources Research, 1999, 35 (3) : 797-810.
[9] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 用空间内插法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征 [J]. 自然科学进展, 2002, 12 (4) : 430-433. (WANG Jun, FU Bojie, QIU Yang, et al. Study on soil moisture of a small watershed on the Loess Plateau with spatial interpolative methods [J]. Advances in Natural Science, 2002, 12 (4) : 430-433. (in Chinese))
[10] 汪星, 周玉红, 汪有科, 等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究 [J]. 水利学报, 2015, 46 (3) : 263-270. (WANG Xing, ZHOU Yuhong, WANG Youke, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (3) : 263-270. (in Chinese))
[11] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性 [J]. 水科学进展, 2012, 23 (3) : 310-316. (WANG Yunqiang, SHAO Ming' an, LIU Zhipeng. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (3) : 310-316. (in Chinese))
[12] 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. (WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, CONG Wei, et al. Spatial variability of soil moisture on slope-land under different land uses on the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (12): 65-71. (in Chinese))
 - [13] 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, 2000, 55 (1): 84-91. (WANG Jun, FU Bojie. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (1): 84-91. (in Chinese))
 - [14] QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2001, 240 (3/4): 243-246.
 - [15] LIN H S, KOEGLMANN W, WALKER C, et al. Soil moisture patterns in a forested catchment: a hydropedological perspective [J]. Geoderma, 2006, 131: 345-368.
 - [16] LIN H, ZHOU X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment [J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59: 34-49.
 - [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 266-295.
 - [18] 冯益明, 唐守正, 李增元. 空间统计分析在林业中的应用 [J]. 林业科学, 2004, 40 (3): 149-155. (FENG Yiming, TANG Shouzheng, LI Zengyuan. Application of spatial statistic analysis in forestry [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40 (3): 149-155. (in Chinese))
 - [19] DEUTSCH C V, JOURNAL A G. GSLIB geostatistical software library and user's guide [M]. 2nd Edition. Oxford: Oxford University Press, 1998.
 - [20] 王孟本, 李宏建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究 [J]. 生态学报, 1995, 15 (2): 178-184. (WANG Mengben, LI Hongjian. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in northwestern Shanxi [J]. Acta Ecol Sin, 1995, 15 (2): 178-184. (in Chinese))
 - [21] YIN J, Young M, YU Z. Effects of paleoclimate and time-varying canopy structures on paleowater fluxes [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113 (D6): 304-312. doi: 10. 1029/2007JD009010.
 - [22] FAMIGLIETTI 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: 259-281. (收稿日期: 2015 - 10 - 15 编辑: 彭桃英)
- +++++
- (上接第 4 页)
- [9] 李琪, 李德尚, 熊邦喜, 等. 放养鲢鱼对水库围隔浮游生物群落的影响 [J]. 生态学报, 1993, 13 (1): 30-37. (LI Qi, LI Deshang, XIONG Bangxi, et al. Influence of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) on plankton community in reservoir enclosures [J]. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13 (1): 30-37. (in Chinese))
 - [10] DOMAIZON I, DEVAUX J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir (France) [J]. Aquatic Ecology, 1999, 33: 193-204.
 - [11] KAJAK Z, RYBAK J, SLXXTNIEWSKA I, et al. Influence of the planktivorous fish, *Hypophthalmichthys molitrix*, on the plankton and benthos of the eutrophic lake [J]. Pol Arch Hydrobiol, 1975, 22: 301-310.
 - [12] LAZZARO X. A review of planktivorous fishes: their evolution, feeding behaviours, selectivities, and impacts [J]. Hydrobiologia, 1987, 146: 97-167.
 - [13] 刘焕亮. 鲢鱼、鳙鱼的滤食器官 [J]. 大连水产学院学报, 1981, 6 (11): 13-33. (LIU Huanliang. The filtering apparatus of silver carp and bighead carp [J]. Journal of Dalian Ocean University, 1981, 6 (11): 13-33. (in Chinese))
 - [14] 王丽卿, 许莉, 陈庆江, 等. 鲢鳙放养水平对淀山湖浮游植物群落影响的围隔实验 [J]. 环境工程学报, 2011, 5 (8): 1790-1794. (WANG Liqing, XU Li, CHEN Qingjiang, et al. Stocking level effects of silver and bighead carps on the phytoplankton community in enclosures in Dianshan Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (8): 1790-1794. (in Chinese))
 - [15] SOSNOVSKYA A, QUIRO R. Effects of fish manipulation on the plankton community in small hypertrophic lakes from the Pampa Plain (Argentina) [J]. Limnologica, 2009, 39: 219-229.
 - [16] DRENNER R W, BACA R M. Community responses to piscivorous largemouth bass: a biomanipulation experiment [J]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18 (1): 44-51.
 - [17] 陈少莲, 刘肖芳, 胡传林, 等. 论鲢、鳙对微囊藻的消化利用 [J]. 水生生物学报, 1990, 14 (1): 49-59. (CHEN Shaolian, LIU Xiaofang, HU Chuanlin, et al. On the digestion and utilization of microcystis by fingerlings of silver carp and bighead [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14 (1): 49-59. (in Chinese))
 - [18] OPUSZYNSKI K. The influence of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) on eutrophication of the environment of carp ponds [J]. Roczniki Nauk Rolniczych, 1978, 99H: 127-151. (收稿日期: 2016 - 08 - 02 编辑: 彭桃英)