

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbcdqk.2015.04.035

不同下垫面的土壤水分时间稳定性分析

赵娜娜^{1,2,3}, 李传哲^{1,2}, 刘佳², 穆文彬², 于福亮², 邢九平⁴

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 中国林业科学研究院 湿地研究所, 北京 100091; 4. 河北省水利工程局, 石家庄 050021)

摘要: 时间稳定性是分析土壤水分时空变异性的的重要因素, 对土壤水分时间稳定性的分析可为区域土壤墒情的预测及水资源量的评估、以及水文模型的发展等提供依据。在 2 m² 坡面尺度上, 采用 EG-5 土壤水分传感器对四种土地利用类型(玉米、小麦、草地和裸地)在两种坡度(5°、15°)下浅层土壤水分的时间稳定性进行分析。基于相对差分法和 Spearman 秩相关系数分析法研究得出: 不同植被类型、坡度下浅层土壤水分具有一定的时间稳定性, 其不同深度的平均相对偏差(MRD)及其标准差均很小; 不同坡度间的土壤水分时间稳定性差异不显著, 而植被类型对土壤水分时间稳定性影响较大, 相比而言, 玉米和草地的土壤水分标准差相对较大, 土壤水分时间稳定性明显低于小麦和裸地。

关键词: 土壤水分; 时间稳定性; 植被类型; 坡度; spearman 秩相关系数; 相对差分法

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0765-06

Temporal stability of soil water under different soil coverages

ZHAO Nana^{1,2,3}, LI Chuangzhe^{1,2}, LIU Jia², MU Wenbin², YU Fuliang², XING Jiuping⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Hebei Provincial Water Conservancy Bureau, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Temporal stability is an important factor to analyze the spatial and temporal variability of soil water, so its study can provide reference for the prediction of local soil moisture, evaluation of water resources, and development of hydrology modeling. According to the real time monitoring of soil moisture data collected by EG-5 sensors in the hillslope scale of 2 m², the temporal stability of shallow soil water under four different vegetation covers (spring maize, wheat, ryegrass, and bare land) were analyzed using the relative difference method and Spearman rank correlation coefficient method. Results showed that the temporal stability occurs in the shallow soil water under different vegetable types and slopes with small MRD and standard deviation values at various soil depths. There was no significant difference for the temporal stability of soil water under different slopes, but obvious difference under different vegetation types. The temporal stability of soil water for maize and ryegrass was obviously lower than that of wheat and bare land with smaller MRD and standard deviation values.

Key words: soil water; temporal stability; vegetation type; slope; Spearman rank correlation coefficient; relative difference

1 研究背景

土壤水是水文循环过程中的关键状态变量, 对水文过程, 如降雨入渗、蒸发、径流形成过程等有重要的作用, 同时, 土壤水也是农田生态系统维持和区域灌溉制度制定的基础

和依据。然而, 由于土壤类型、结构、质地等的空间变异性及区域气候、植被、地形等因素的影响, 土壤水分具有一定的时空变异性, 而如何对土壤水分时空变异性进行定量分析和描述也是影响流域水文模型模拟精度的重要因素之一。因此, 准确分析区域土壤水分的时空动态变化对于水文模型的发

收稿日期: 2014-11-13 修回日期: 2015-06-16 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1240.011.html>

基金项目: 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金(2012B093); 中国水利水电科学研究院科研专项(1232); 国家自然科学基金(51209225; 51409270); 国家国际科技合作专项资助(2013DFG70990)

作者简介: 赵娜娜(1985-), 女, 河南灵宝人, 助理研究员, 博士, 主要从事农田作物耗水规律、水文学及水资源方面研究。E-mail: arnazhao2009@163.com

通讯作者: 于福亮(1953-), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: yufl@iwhr.com

展以及区域水资源的评价、保护和管理等都是很有必要的。

国内外许多学者对土壤水分的时空变异性,尤其是土壤水分的空间变异性进行了大量的研究^[1-4],而这种研究实际上是基于土壤水分在时间上具有一定的稳定性。所谓土壤水分的时间稳定性, Vachaud^[5] 通过土壤水分的试验研究发现:将所有测点的土壤水分含量按高低排序后,不同测量时间下这些测点的顺序基本没有变化或变化不大,这种土壤水分的空间格局随时间相对稳定的现象就是时间稳定性(time stability),一些学者将时间稳定性定义为:在既定的土壤类型中,空间位置和经典的统计参数在时间上相对不变的联系。Kachanoski^[6]和 de Jong^[7]将时间稳定性重新定义为土壤水分在不同空间形式上表现出的时间一致性,是与空间尺度有关的空间分布结构或模式在时间上持续性,空间某点的土壤含水量是各种水文过程在不同空间尺度上共同作用的结果。

由于土壤水分实时测量需要先进的测量技术,耗时多、成本高,许多研究者试图寻找、提出一种新的、可以减少用以描述研究区域内土壤水分特性所需的实测点的方法,从而节省成本提高效率。因此,如何使用较少的实测点并能够代表研究区域或流域的平均土壤水分,这对流域的径流模拟精度具有很大的影响。通过对土壤水分时间稳定性的分析,可利用最少的土壤水分数据测量来表征山坡或流域尺度的平均土壤含水率,因此,土壤水分时间稳定的概念一经提出就得以广泛研究和应用。一些研究学者已经证实了时间稳定的测点位置可以很好地表征小流域的平均土壤含水率。Grayson 和 Western^[8]应用时间稳定性的概念对流域进行研究,发现在研究区域内存在一些可以连续地表征整个研究区域平均土壤水分状况的位置,将其称之为流域平均土壤水分监测点(CASMM)。Martinez 和 Ceballos^[9]也提出了相似的概念 RMSM,即典型平均土壤水分实测点,这些代表性的实测点可以代表整个流域的平均土壤水分状况。我国的一些学者也针对不同区域的土壤水分时间稳定性进行研究,如黄土高原地区土壤水分时间稳定性的尺度性及其尺度性研究^[10-11],干旱、半干旱荒漠化地区的浅层土壤水分时间稳定特性^[12],四川盆地丘陵地区^[13]等,而针对华北地区不同下垫面类型下的土壤水分时间稳定性特征研究相对较少。本文通过室内试验,采用相对差分法及 Spearman 秩相关系数分析法对华北地区不同下垫面的土壤水分时间稳定性特征进行分析和研究,以为该区域水文模型的发展、农业水管理及生态环境建设等提供研究依据。

2 材料与方法

2.1 试验布设

为了研究不同下垫面类型的土壤水分动态变化过程,试验采用 6 个可自动调节坡度的坡面径流试验装置(长×宽×高= 200 cm × 100 cm × 60 cm),采用分层回填的方式每隔 5 cm 进行分层装土,土壤干容重控制在 1.41 g/cm³ 左右,总土层厚度为 50 cm,可基本视为各向同性、均质土壤。为了观测降水过程中的地表径流及壤中流产流情况,土槽出口的纵剖面用铁质的百叶窗封装,同时在百叶窗内侧安装纱网,防止降水过程中的土壤侧漏。装土完成后将土槽调整到试验设定坡度(5° 和 15°),洒水加速土壤沉积以更接近于原状土的性状。同时在试验土槽中分别种植小麦、玉米及黑麦草,并设置两个重复,以研究坡度、土地利用类型对土壤水分变化的影响。此外,为了便于有无植被覆盖下的土壤水分分布的对比分析,将其中一个土槽设为裸荒地,其坡度为 5°。

试验主要采用室内人工模拟降雨的方式,降雨结束后将土槽移至野外天然条件下以观测蒸发过程中土壤水分的动态变化过程。试验阶段内的降水量见图 1,人工模拟降雨的设计雨强为 0.45 mm/min 和 0.7 mm/min,其中小麦和玉米整个生育期内进行了 6 场人工降雨,为了研究土壤接近饱和情况下的土壤水分运动过程,对草地和裸地总共开展了 11 场人工模拟降雨,设计雨强及降雨历时详见表 1。试验过程中在各土槽中随机选取采样点,用环刀取土,进行土壤理化性质的测定,见表 2。

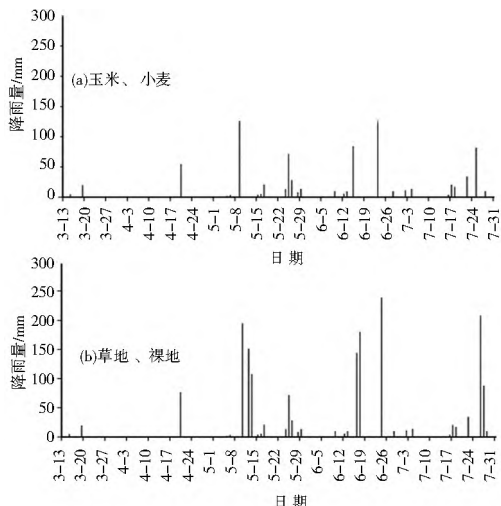


图 1 试验期内各下垫面的降雨量(包括人工降雨及天然降雨)

Fig. 1 The rainfall amounts of different soil coverages, including simulated and natural rainfall

表 1 草地及裸地人工降雨设计雨强及降雨历时

Tab. 1 The design rainfall intensity and duration of grassland and barland

项目	P1	P2	P2*	P3	P4	P5	P6	P7	P7*	P8	P9	P10	P10*	P11
设计雨强/(mm·min ⁻¹)	0.42	0.75	0.42	0.42	0.42	0.50	0.50	0.75	0.42	0.58	0.49	0.70	0.58	0.43
历时/min	183	180	120	360	360	360	360	180	180	360	180	180	180	180

注: P2, P7 和 P11 降雨为一组变雨强试验, P2*, P7*, P10* 降雨即为该场降雨中的第二个设计雨强。

表 2 试验区土壤基本理化性质

Tab. 2 The physical and chemical properties of soils in the study area

饱和含水量 /(m ³ ·m ⁻³)	田间持水量 /(m ³ ·m ⁻³)	饱和导水率 /(mm·min ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	全钾 /(g·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	有机质 /(g·kg ⁻¹)	机械组成(%)		
							< 0.002	0.002~0.02	> 0.02
0.392	0.256	0.013	0.61	19.6	0.48	1.18	11.8	25.8	62.4

为了实时监测土壤水分动态变化过程及坡面内土壤水分时空变化规律,沿土槽的坡长方向,在距土槽顶端 30 cm、100 cm 和 170 cm 处(即 A1-A3、B1-B3 剖面)分别埋设三组土壤水分传感器,埋设深度为 10 cm、20 cm、40 cm(见图 2),以观测不同坡位、不同土壤深度的水分动态变化过程。试验采用的土壤水分传感器的型号为 EG 5(Decagon, USA),其基本原理是通过测量土壤中的介电常数来计算土壤体积含水率,测量精度可达到 $\pm 1\% \sim 2\%$ ^[14-15];此外,由于该传感器体积小,其主体部分长度仅为 5 cm,适合长期埋设在野外进行土壤水分的长期监测而被广泛用于体积土壤含水率的测定^[16-17]。土壤含水率数据主要采用配套的 EM 50 数据采集器(Decagon, Pullman, Washington, USA)于 2013 年 3 月至 2013 年 9 月对各测点进行采集,数据监测时间频率为 1 h。同时,采用传统的取土烘干法对 EG 5 土壤水分传感器的监测数据进行率定和校准,其校准方程为: $\theta_{\text{corr}} = 0.9249\theta_{\text{abs}}, R^2 = 0.997$ 。

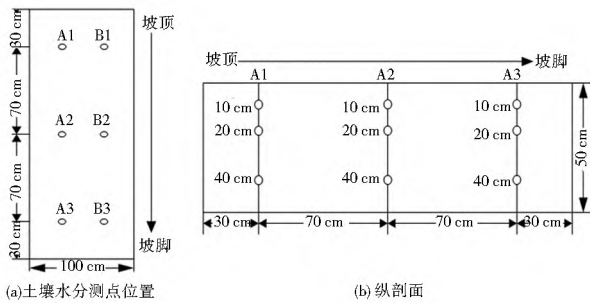


图 2 坡面径流场土壤水分传感器布设

Fig. 2 Layout of soil moisture sensors

2.2 研究方法

(1) 相对差分法。

相对差分法主要通过计算平均相对差分(MRD)和绘制平均相对差分的标准差图($\sigma_{i,j}$)来分析土壤水分时间稳定性,通过平均相对差分图可以显示出估算区域平均土壤水分的实测点位置。根据 Vachaud^[5]及 Grayson 和 Western^[8]推荐的方法,对本研究试验研究的 4 种不同下垫面处理的时间稳定性进行分析。其中相对差分的计算公式为

$$\delta_{i,j} = \frac{S_{i,j} - S_j}{S_j} \quad (1)$$

$$S_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{i,j} \quad (2)$$

$$MRD_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (\delta_{i,j} - MRD_i)^2}{m}} \quad (4)$$

式中: $S_{i,j}$ 为在 j 时间测点位置 i 的土壤水分实测值; S_j 为 j 时刻的土壤水分平均值; $\delta_{i,j}$ 为 j 时刻测点位置 i 的土壤水分相对差分; n 为观测点的个数; MRD_i 为测点位置 i 的平均相对差分; m 则为观测的样本时间的数量; σ_i 为测点位置 i 的相对差分的标准差。

计算每一个测点位置的平均相对差分(MRD),以相对差分的标准差作为误差,按照顺序排列绘制成图来确定哪个实测点位置可以代表/估算流域的平均土壤水分值。通常有两种判定标准来选择理想的平均土壤水分测点:一种方法是测点位置周围的平均相对差分为 0,说明该测点能够精确地

估算山坡的平均值,另一种方法是标准差很小(即误差条较短),则说明其估算值变差较小。如果一个测点同时具备了上述两种特性,可以认为该测点位置能够很精确地估算山坡/流域的平均土壤水分。

(2) Spearman 秩相关系数法。

采用 Spearman 非参数检验法分析不同测点的秩随时间变化的一致性和稳定性,主要反映测量样点的空间模式在时间上的相似性,其值越接近于 1 说明土壤水分的空间模式在时间上越相似,即土壤水分的时间稳定性越强,其计算公式如下:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

式中: d 为观测序列的等级差,即同一观测点在不同观测时刻的秩的差; n 为观测点个数。 ρ 越接近于 1,说明其稳定越好。

3 结果与讨论

3.1 相对差分

根据式(1)~式(4)计算试验阶段内各个下垫面不同测点各深度的土壤含水率平均相对差分 MRD 及其标准差 σ ,将不同深度的土壤含水率平均相对差分由小到大进行排列,绘制相对差分图,分析其时间稳定性。图 3 至图 5 即为小麦、玉米、草地、裸地在生长期 3 月~9 月不同位置的土壤水分观测点的平均相对差分图,平均相对差分为正,说明相应的测点位置与实测平均值相比较为湿润;负值则相反,说明该点土壤含水率相对较低。标准差 σ 越小说明样点的时间稳定性越强,而 Spearman 系数越接近于 1,表明土壤水分的空间模式在不同时间越相似。

由图 3~图 5 可以看出,同一土地利用类型下,10 cm、20 cm,以及 40 cm 不同深度平均相对差分 MRD 变化范围差异不大,总体上 40 cm 深度的土壤水分稳定性略高,土壤层时间稳定性随深度增加而增强,可能是由于植被根系吸水、林冠影响土壤蒸发、地形引起的变异以及降水等对表层土壤的影响较大,并且较深层的土壤结构以及土壤的持水能力相对更加稳定,这说明影响土壤水分时间稳定性的因素存在深度上的依赖性。图中的误差线为相对差分值的标准差,其大小说明了各测点土壤含水率与平均含水率之间相对差分的离散程度,标准差越小说明土壤水分时间稳定性越高。由图可以看出:而标准差则随着深度逐渐增加(如小麦三个不同深度的标准差的平均值分别为 0.062、0.066 和 0.092),这可能是由于试验土槽底部的设计为封闭型,使得土壤在饱和或者接近饱和后降雨入渗的水分更容易在土壤底部集聚,从而使深层土壤含水率相对较高,而使其稳定性相对较弱。高磊^[10]在对黄土高原小流域的土壤水分时间稳定性进行分析时也发现:低含水量的样点往往有更强的时间稳定性,而高含水量的样点更趋于不稳定,但同时也指出测量点含水量的高低和时间稳定性强弱之间并没有必然的关系。

不同土地利用类型下,土壤水分监测点各深度的土壤水分有相对较强的时间稳定性,所有的 MRD 值都非常低,说明不同下垫面条件下土壤水分具有很好的整体时间稳定性。 5° 麦地 0~10 cm 的土壤水分平均相对偏差变化范围为 $-5.9\% \sim 10.9\%$,20 cm 为 $-9.1\% \sim 7.7\%$,40 cm 为 $14.5\% \sim 17.3\%$; 15° 三个不同深度的平均相对差分变化范围分别为

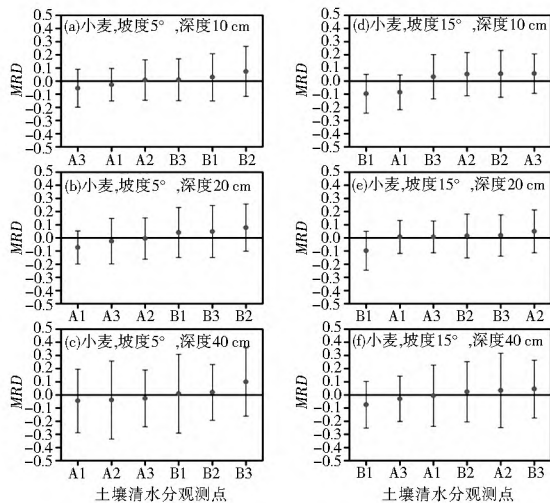


图 3 麦地不同土壤水分观测点的平均相对差分

Fig. 3 The MRD scatter plots of different observed soil moisture points for wheat

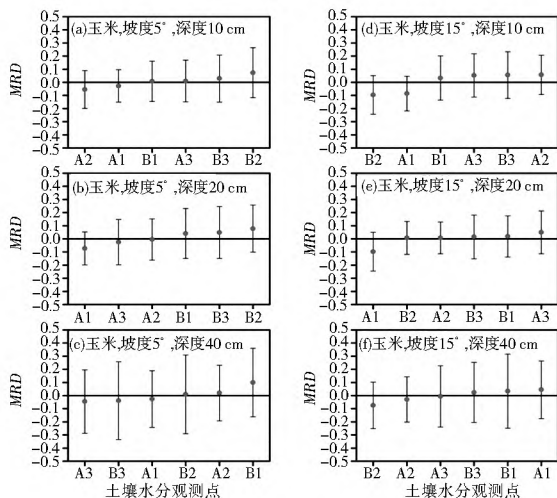


图 4 玉米不同土壤水分观测点的平均相对差分

Fig. 4 The MRD scatter plots of different observed soil moisture points for maize

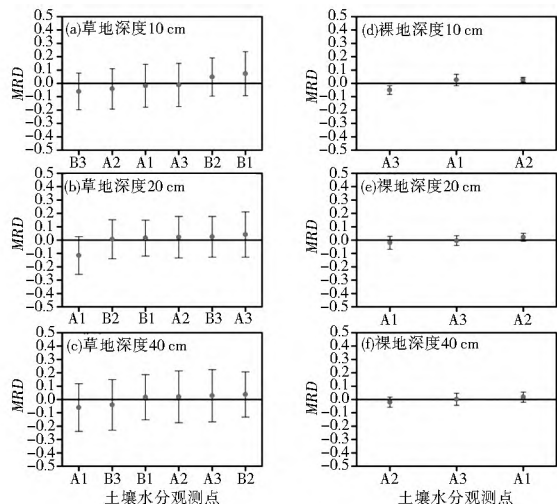


图 5 草地及裸地不同土壤水分观测点的平均相对差分

Fig. 5 The MRD scatter plots of different observed soil moisture points for grassland and bareland

米 0~10 cm 的土壤水分平均相对偏差变化范围为 -5.5%~7.3%, 20 cm 为 -7.3%~7.8%, 40 cm 为 -4.6%~9.9%; 15° 则分别为 -9.7%~5.7%、-9.7%~5.0%、-7.5%~4.5%。草地 10 cm、20 cm、40 cm 的土壤水分平均相对差分变化范围分别为 -4.1%~7.3%、-11.6%~4.2%、-6.1%~3.7%，裸地则分别为 -4.9%~2.7%、-2.0%~2.2%、-2.0%~1.8%。同时，不同土地利用类型之间，玉米、草地的土壤水分标准差明显高于其它小麦和裸地，可能与土壤水分观测期正是春玉米、黑麦草的主要生长阶段有关，也说明了植被对土壤水分的变异性 and 稳定性有明显影响，与 Hupet 和 Vanclooster^[18] 的研究结果基本相符。

根据 MRD 接近于 0 且标准差很小的原则可判断不同坡度、深度的最佳土壤水分观测点位置，即可以代表整个区域的平均土壤水分值。小麦 5° 处理中 10 cm 及 20 cm 深度的平均土壤水分观测点为 A2，40 cm 深度则为 B1；15° 中 10 cm、20 cm、40 cm 深度则分别为 A2、B2、B2，总体上对于小麦而言，坡中位置应为土壤水分最佳监测点，能够容易较好地估算整个坡面的土壤水分平均值。玉米不同坡度下各深度的土壤水分最优观测点差异较大，5° 条件下 10 cm、20 cm、40 cm 深度分别为 A1、A2、A1，15° 条件下则为 B1、A2、A2，这可能与玉米生育期内初始土壤含水率较低有关，整体上 5° 处理的玉米其土壤水分观测点可选为 A1，即坡顶位置，而 15° 则为坡中位置(A2)。草地则为坡顶位置(A1/B1)，裸地为坡中(A2)位置最佳。

3.2 Spearman 秩相关系数

采用 Spearman 秩相关系数 ρ 对相同植被类型、不同深度、坡度的 MRD 进行比较，结果如表 3-表 6。总体上相关系数相对较高，表明浅层土壤水分具有一定的时间稳定性。麦地 5° 只有 10 cm 和 20 cm，20 cm 和 40 cm 深度，及 15° 中 20 cm 和 40 cm 深度有较高的相关系数外，其余深度间的相关性并不显著。而玉米不同深度间也没有显著的相关性，草地和裸地在 20 cm 和 40 cm 深度的相关性达到极显著水平(置信水平为 0.01)。这很可能是由于不同下垫面的土壤含水率的差异引起的，Penna^[19] 等通过实测数据分析认为气象条件的差异也可能是造成表层与深层数据差异的主要原因。此外，不同的前期土壤湿润条件也会对各深度的 MRD 值及标准差产生影响^[20]。

4 结论

文中采用了两种相对比较广泛应用的相对差分法和 Spearman 秩相关系数分析法对 2 m² 小尺度上不同下垫面类型的浅层土壤水分时间稳定性进行分析，研究结果表明：10 cm、20 cm 和 40 cm 深度的土壤水分具有明显的时间稳定性，且这种稳定性随着深度的增加逐渐增强。土地利用类型对土壤水分的时间稳定性影响很大，相同土壤和气候条件下，玉米和草地的土壤水分变异性明显高于小麦和裸地，Hupet 和 Vanclooster^[18] 认为玉米生长阶段的变化也会引起较大土壤水分的变异性，Gomez Plaz 等^[21] 也对植被和地形因素对土壤水分的时间稳定性的影响进行分析表明植被会使土壤水分在空间分布结构上具有较大的变异性。而不同坡度间土壤水分时间稳定性差异并不明显，可能与回填的土壤表面相对平整、的洼地等因素有关。不同深度的 Spearman

- 13.2%~6.8%、-6.4%~6.8%、-5.1%~5.2%。5° 玉

表3 小麦地不同深度的MRD值Spearman相关系数矩阵

Tab.3 The Spearman correlation matrix of MRD at different soil depths for wheat

小麦	坡度 5°, 深度 10 cm	坡度 5°, 深度 20 cm	坡度 5°, 深度 40 cm	坡度 15°, 深度 10 cm	坡度 15°, 深度 20 cm	坡度 15°, 深度 40 cm
坡度 5°, 深度 10 cm	1					
坡度 5°, 深度 20 cm	0.886*	1				
坡度 5°, 深度 40 cm	0.657*	0.886*	1			
坡度 15°, 深度 10 cm	-0.257	0.086	0.086	1		
坡度 15°, 深度 20 cm	0.029	0.314	0.2	0.486	1	
坡度 15°, 深度 40 cm	0.143	0.371	0.314	0.2	0.886*	1

注: * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。以下同。

表4 玉米不同深度的MRD值Spearman相关系数矩阵

Tab.4 The Spearman correlation matrix of MRD at different soil depths for maize

玉米	坡度 5°, 深度 10 cm	坡度 5°, 深度 20 cm	坡度 5°, 深度 40 cm	坡度 15°, 深度 10 cm	坡度 15°, 深度 20 cm	坡度 15°, 深度 40 cm
坡度 5°, 深度 10 cm	1					
坡度 5°, 深度 20 cm	0.714*	1				
坡度 5°, 深度 40 cm	-0.371	0.257	1			
坡度 15°, 深度 10 cm	-0.429	-0.143	-0.086	1		
坡度 15°, 深度 20 cm	0.143	0.029	-0.2	0.429	1	
坡度 15°, 深度 40 cm	-0.371	-0.543	-0.029	-0.086	-0.029	1

表5 草地不同深度的MRD值Spearman相关系数矩阵

Tab.5 The Spearman correlation matrix of MRD at different soil depths for grassland

草地	坡度 5°, 深度 10 cm	坡度 5°, 深度 20 cm	坡度 5°, 深度 40 cm	坡度 10°, 深度 10 cm	坡度 10°, 深度 20 cm	坡度 10°, 深度 40 cm
坡度 5°, 深度 10 cm	1					
坡度 5°, 深度 20 cm	0.5	1				
坡度 5°, 深度 40 cm	0.5	1.000**	1			
坡度 10°, 深度 10 cm	-0.5	-1.000**	-1.000**	1		
坡度 10°, 深度 20 cm	1.000**	0.5	0.5	-0.5	1	
坡度 10°, 深度 40 cm	-1.000**	-0.5	-0.5	0.5	-1.000**	1

注: ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的。以下同。

表6 裸地不同深度的MRD值Spearman相关系数矩阵

Tab.6 The Spearman correlation matrix of MRD at different soil depths for bareland

裸地	深度 10 cm	深度 20 cm	深度 40 cm
深度 10 cm	1		
深度 20 cm	0.5	1	
深度 40 cm	-0.5	-1.000**	1

秩相关系数对比,总体上相关系数相对较高,表明浅层土壤水分具有一定的时间稳定性,但可能受降水及植被的影响,仅部分深度之间有明显的相关性,不同下垫面的各深度的土壤水分没有明显的相关性。同时,不同坡度间的很低的MRD的秩相关系数也说明了地形因素对土壤水分的时间稳定性影响很小,这与相对差分法的分析结果一致。

通过不同土地利用类型下土壤水分时间稳定性在不同土壤剖面的分布特性的试验分析和研究,验证了小尺度上浅层土壤水分时间稳定性的存在及不同土地利用类型对其的影响,但是由于土壤水分的影响因素具有明显的时间和尺度依赖性,本文的研究仅对植被和坡度因素的影响进行初步分析,而不同尺度以及土壤深度下土壤水分时间稳定性及其影

响因素还需进一步定量分析和探讨。

参考文献(References):

- [1] 余冬立,邵明安,俞双恩.黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J].农业机械学报,2010,41(7):57-63.(SHE Dong li,SHAO Ming an,YU Shuang en. Spatial variability of soil water content on a cropland grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 57-63. (in Chinese))
- [2] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Spatial Temporal Variability of Soil Moisture and its Estimation Across Scales[J]. Water Resources Research. 2010, 46(2): W 2516.
- [3] L B, R M, F M, et al. Soil Moisture Spatial Variability in Experimental Areas of Central Italy[J]. Journal of Hydrology. 2007, 333(2-4): 356-373.
- [4] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地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 Quanjiu. 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))

- [5] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal Stability of Spatially Measured Soil Water Probability Density Function[J]. Soil Science Society of America Journal. 1985, 49(4): 822-828.
- [6] Kachanoski R G, Jong E. Scale Dependence and the Temporal Persistence of Spatial Patterns of Soil Water Storage[J]. Water Resources Research. 1988, 24(1): 85-91.
- [7] De Jong C. The Contribution of Condensation to the Water Cycle Under High Mountain Conditions[J]. Hydrological Processes. 2005, 19(12): 2419-2435.
- [8] Grayson R B, Western A W. Towards Areal Estimation of Soil Water Content From Point Measurements: Time and Space Stability of Mean Response[J]. Journal of Hydrology. 1998, 207(1): 68-82.
- [9] J M, Ceballos A. Mean Soil Moisture Estimation Using Temporal Stability Analysis[J]. Journal of Hydrology. 2005, 312(1): 28-38.
- [10] 高磊. 黄土高原小流域土壤水分时间稳定性及空间尺度性研究[D]. 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012. (GAO Lei. Temporal stability and the spatial scaling of soil moisture in a small watershed on the Loess Plateau[D]. Chinese Academy of Sciences (Institute of Soil and Water Conservation), 2012. (in Chinese))
- [11] 白一茹, 邵明安. 黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 45-50. (BAI Yi ru, SHAO Ming an, Temporal stability of soil water storage on slope in rainfed region of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 45-50. (in Chinese))
- [12] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 81-86. (PAN Yan xia, WANG Xin ping, SU Yan gui, et al. Temporal Stability of Surface Soil Moisture in Artificially Revegetated Desert Area[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 81-86. (in Chinese))
- [13] 王改改, 魏朝富, 吕家格, 等. 四川盆地丘陵区土壤水分空间变异及其时间稳定性分析[J]. 山地学报, 2009, 27(2): 211-216. (WANG Ga gai, WEI Chao fu, Lv Jia ke, et al. Spatial Variation and Its Temporal Stability of Soil Water in Hilly Area of Sichuan Basin[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(2): 211-216. (in Chinese))
- [14] Bogena H R, Huisman J A, Oberdörster C, et al. Evaluation of a Low-Cost Soil Water Content Sensor for Wireless Network Applications[J]. Journal of Hydrology. 2007, 344(1): 32-42.
- [15] Campbell G S, Greenway W C, Others. Moisture Detection Apparatus and Method: 2005/6/14.
- [16] Ritsema C J, Kuipers H, Kleiboer L, et al. A New Wireless Underground Network System for Continuous Monitoring of Soil Water Contents[J]. Water Resources Research. 2009, 45(4): W36D.
- [17] Burnett S E, Iersel M W V. Morphology and Irrigation Efficiency of Gaura Lindheimeri Grown with Capacitance Sensor Controlled Irrigation[J]. Hortscience. 2008, 43(5): 1555-1560.
- [18] F H, M V. Intraseasonal Dynamics of Soil Moisture Variability within a Small Agricultural Maize Cropped Field[J]. Journal of Hydrology. 2002, 261: 86-101.
- [19] Penna D, Tromp Van Meerveld H J, Gobbi A, et al. The Influence of Soil Moisture On Threshold Runoff Generation Processes in an Alpine Headwater Catchment[J]. Hydrology and Earth System Sciences. 2011, 15(3): 689-702.
- [20] Martinez Mena M, Albaladejo J, Castillo V M. Factors Influencing Surface Runoff Generation in a Mediterranean Semi-Arid Environment: Chicamo Watershed, Se Spain [J]. Hydrological Processes. 1998, 12: 741-754.
- [21] Gomez Plaza A, Alvarez Rogel J, Albaladejo J, et al. Spatial Patterns and Temporal Stability of Soil Moisture Across a Range of Scales in a Semi-Arid Environment[J]. Hydrological Processes. 2000, 14: 1261-1277.

(上接第 736 页)

与遗传算法相比, 寻优效率大为提高(本例中提升 300 倍), 参数识别结果精度高。

为了便于验证, 本例采用了一个理想的含水层算例, 今后将结合实际案例, 利用 Condor 算法可并行性的优点, 可将其推广应用到复杂、非凸、高运算负荷的参数识别问题中。

参考文献(References):

- [1] Zheng C, Wang P. Parameter structure identification using tabu search and simulated annealing [J]. Advances in Water Resources, 1996, 19(4): 215-224.
- [2] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (XUE Yu qun, XIE Chun hong. Numerical Simulation for Groundwater[M]. Peking: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] Willis R, Yeh W W G. Groundwater systems planning and management[M]. NJ: Prentice Hall Inc., 1987.
- [4] Tolson, B. A., and C. A. Shoemaker. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration, Water Resources Research, 2007, 43(1).
- [5] Powell M J D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation [M]. Oaxaca, Mexico: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [6] Conn A, Scheinberg K, Toint P. Recent progress in unconstrained nonlinear optimization without derivatives[J]. Mathematical Programming, 1997, 79(1): 397-414.
- [7] Powell M J D. UOBYQA: unconstrained optimization by quadratic approximation[J]. Mathematical Programming, 2002, 92(3): 555-582.
- [8] Vanden Berghen F, Bersini H. CONDOR, a new parallel, constrained extension of Powell's UOBYQA algorithm: Experimental results and comparison with the DFO algorithm[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 181(1): 157-175.
- [9] 郑春苗, 贝聂特. 地下水污染物迁移模拟[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009. (ZHENG Chun miao, C Bennett G D. Applied contaminant transport modeling(Second Edition)[M]. Peking: Higher Education Press, 2009. (in Chinese))