

基于数值模拟的土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响分析

李 玲¹，武冬冬¹，王铁军^{1,2}，狄崇利^{1,2}

(1.天津大学地球系统科学学院表层地球系统科学研究院,天津 300072;
2.天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室,天津 300072)

摘要：为探究不同气候条件下土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响，利用 HYDRUS-1D 模型，以湿润、半干旱和干旱气候区的气象数据为驱动，结合生成的砂土和黏壤土土壤水力参数集，模拟生成土壤水时间序列集；而后，利用去趋势波动分析法对生成的土壤水数据进行长程相关性分析。结果表明：(1)土壤水标度指数(h)介于 0.570~1.915，土壤水中存在显著的长程相关性。砂土中土壤水变化主要表现为持续性，黏壤土中持续性和反持续性均较为显著。(2)土壤水长程相关性与土层深度、黏粒含量、干旱指数存在正相关关系。(3)影响土壤水长程相关性的主要土壤水力参数包括土壤孔隙分布参数(n)、进气值倒数(α)和饱和导水率(K_s)。在砂土中， n 是所有气候区中土壤水长程相关性的主要控制参数；在黏壤土中， α 是湿润区、 α 和 K_s 是干旱和半干旱区土壤水长程相关性的主要控制参数。研究结果为揭示土壤水长期演变机理提供依据。

关键词：土壤水；长程相关性；去趋势波动分析法；HYDRUS-1D；土壤水力参数

中图分类号：S152.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)01-0080-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.012

Effects of Soil Hydraulic Parameters on Long-range Correlation of Soil Moisture Based on Numerical Simulation

LI Ling¹，WU Dongdong¹，WANG Tiejun^{1,2}，DI Chongli^{1,2}

(1.Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072;
2.Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin 300072)

Abstract: To investigate the effects of soil hydraulic parameters on the long-range correlation of soil moisture under different climatic conditions, a 1-D vadose zone model (HYDRUS-1D) was utilized to simulate soil moisture time series under different climatic conditions in China (humid area, semi-arid area, and arid area) using generated soil hydraulic parameters datasets for sandy and clay loam soils. Then, the long-range correlation of soil moisture data was calculated by detrended fluctuation analysis. The results showed that: (1) The scale exponent (h) of the simulated soil moisture ranged from 0.570 to 1.915, indicating that there was an obvious long-range correlation. Soil moisture time series was mainly characterized by persistence for sandy, but for clay loam, there were both persistence and anti-persistence. (2) The long-range correlation was positively correlated with the soil depth, clay fraction, and aridity index. (3) The main soil hydraulic parameters affecting long-range correlation were n , α , and K_s . Specifically, n was the main hydraulic parameter affecting long-range correlation for sandy soils at all locations. For clay loam soils, α was the predominant hydraulic parameter affecting long-range correlation in humid area, α and K_s were the main hydraulic parameters affecting long-range correlation in semi-arid and arid areas. The results can provide some reference for revealing the long-term evolution mechanism of soil moisture.

Keywords: soil moisture; long-range correlation; detrended fluctuation analysis; HYDRUS-1D; soil hydraulic parameter

土壤水是控制陆地生态系统变化的核心要素，对维持生态系统稳定起着重要作用^[1]。土壤水不仅是四水(地表水、地下水、大气水和土壤水)转换的重要纽带^[2]，还可以调节陆地和大气间的水分和能量平

收稿日期:2021-07-21
资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1804400);国家自然科学基金项目(42171036)
第一作者:李玲(1996—),女,硕士,主要从事土壤水文与生态水文研究。E-mail:lingli18@tju.edu.cn
通信作者:王铁军(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事非饱和带水文、生态水文、土壤水文、陆表过程研究。E-mail:tiejun.wang@tju.edu.cn

衡,影响气候系统演变^[3]。在气候、植被等多种因素的共同作用下,土壤水呈现出强烈的非线性特征^[4],且其时间序列具有长程相关性(或称长期记忆性),即土壤水变化趋势依赖于前期的变化。研究其长程相关性特征可以加深对土壤水动态变化规律的认识,同时为提高水文模型预测精度提供参考^[5]。

目前土壤水长程相关性研究主要集中在变化特征以及外界因素的影响,宋闰柳等^[5]研究华北山区 2004—2007 年土壤水的长程相关性表明,长程相关性随时间尺度的增大而减弱;高雄飞等^[6]研究表明,农田土壤水长程相关性随土层深度增加逐渐增强;Shen 等^[7]研究表明,在长时间尺度上,降雨是土壤水长程相关性的主控因素,而短时间尺度内其主要受太阳辐射影响;Zhang 等^[8]研究八宝河流域阳坡和阴坡的土壤水长程相关性表明,阳坡浅层土壤水长程相关性较弱且主要受太阳辐射和蒸散发的影响,而深层土壤水则主要受季节性融雪的影响,阴坡中深层土壤水的弱长程相关性主要受地下水位和侧向径流补给的影响。关于土壤特性对土壤水长程相关性的研究开展较少,如 Martínez-Fernández 等^[9]分析了黏粒含量、有机质、干容重等对土壤水长期记忆性的影响,但是未有研究从土壤水力参数的角度探讨土壤质地对土壤水长程相关性的影响。土壤水力参数能反映土壤的持水性和导水性,与土壤质地密切相关^[10]。由于在较大空间尺度获得土壤水力参数难以实现,而且随着气候条件的改变,土壤水长程相关性呈现出的差异性与土壤水力参数的关系有待研究。因此,本研究结合 Rosetta3 模型生成的土壤水力参数集^[11],基于 HYDRUS-1D 模型模拟的土壤水时间序列,研究湿润、半干旱和干旱气候区土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响,以便从机理上揭示土壤水的长期变化规律。

1 材料与方法

1.1 模型搭建

1.1.1 HYDRUS-1D 模型基本理论 HYDRUS-1D 模型是一维非饱和带水、热、溶质运移模拟的模型,在土壤水的模拟中得到广泛应用^[12-13]。该模型基于一维的 Richards 方程模拟土壤水运动过程,其数学表达式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) - K(h) \right) - S(h) \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); h 为压力水头(cm); $K(h)$ 为非饱和导水率(cm/d); $S(h)$ 为植物根系吸水速率(cm/d); x 为垂向空间坐标(cm); t 为时间(d)。

求解方程(1)需要确定 θ 、 h 、 $K(h)$ 之间的关系,

本研究选择 van Genuchten-Mualem 模型(VGM)进行参数拟合^[14],VGM 方程表述为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \times S_e^l \times (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中: θ_r 为土壤残余含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和含水量(cm^3/cm^3); S_e 为有效饱和度,无量纲; K_s 为饱和导水率(cm/d); α 为土壤进气值的倒数($1/\text{cm}$); n 为土壤孔隙分布相关的参数; m 为经验参数, $m = 1 - 1/n$; l 为经验参数,通常取 0.5;其余参数意义同上。

1.1.2 模型设置 本研究模拟均质土柱中无植被条件下的土壤水分运动过程,将土柱高度设定为 3 m,上边界选择可产生地表径流的可变大气边界,下边界为自由排水边界。在土柱剖面信息设置中将土壤均匀分为 300 层,共设置 301 个节点。根据土壤水在不同层位的变化情况分别在 10、50 cm 处设置 2 个观测点,以确定不同深度的土壤水长程相关性与土壤水力参数间的相互关系。模拟的土壤水时间序列长度为 5 年,由于土壤初始含水量未知,为了减少初始含水量对模拟结果的影响,本研究将模拟重复 5 次,直到土壤水分情况与大气边界平衡^[15],取最后 5 年的土壤水数据作为最终结果。根据以上模型设置,为明确不同气候条件下土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响,在模型中输入了气象数据和土壤水力参数的组合。

1.2 模型驱动数据

1.2.1 气象数据 基于干旱指数的计算结果,本研究选择广州、郑州和银川地区的气象数据驱动模型运转,3 个气候区的气候条件见表 1,所对应的气候类型分别为湿润、半干旱及干旱气候。HYDRUS-1D 模型输入的气象数据包括日降雨量和日潜在蒸散发量,潜在蒸散发量依据 Hargreaves 方程^[16]求得。研究区所需气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),所选时间为 2000 年 1 月 1 日至 2004 年 12 月 31 日。

1.2.2 土壤水力参数 鉴于 Rosetta3 模型精度高,误差小,本研究的土壤水力参数集由 Rosetta3 模型生成^[11]。研究根据美国农业部土壤质地分类标准,选取砂土和黏壤土 2 种土壤质地输入到 Rosetta3 模型中生成相对应的土壤水力参数(θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 和 K_s)。每种质地的土壤水力参数由 Rosetta3 模型随机各生成 50 组,由表 2 可知,土壤水力参数统计结果

中砂土和黏壤土的水力参数差异明显,其中相差最大的是 n 、 K_s 。此外,在砂土中 K_s 的变异系数较大,为 1.175;而在黏壤土中 α 和 K_s 的变异系数均较大,分别为 1.817、2.673。

表 1 3 个气候区多年平均降水量、多年平均潜在蒸散发量和干旱指数

气候区	经度/(°)	纬度/(°)	多年平均降水量/mm	多年平均潜在蒸散发量/mm	干旱指数
湿润(广州)	113.271	23.135	1863.940	1292.526	0.693
半干旱(郑州)	113.632	34.753	671.900	1139.330	1.696
干旱(银川)	106.237	38.494	187.880	1093.624	5.821

表 2 基于 2 种土壤质地类型生成的土壤水力参数统计特征

土壤 质地	参数 统计	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\alpha /$ (cm^{-1})	n	$K_s /$ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)
砂土	最大值	0.111	0.454	0.145	5.143	7131.849
	最小值	0.006	0.259	0.012	1.327	52.257
	均值	0.055	0.354	0.038	2.799	1625.412
	标准差	0.027	0.045	0.026	0.804	1910.577
	变异系数	0.496	0.128	0.686	0.287	1.175
黏壤土	最大值	0.248	0.608	0.376	2.662	979.917
	最小值	0.015	0.241	0.0002	1.238	0.048
	均值	0.113	0.430	0.042	1.567	78.495
	标准差	0.059	0.082	0.076	0.268	209.846
	变异系数	0.526	0.191	1.817	0.171	2.673

将 3 个气候区的气象数据与砂土和黏壤土各 50 组水力参数数据自由组合,然后输入 HYDRUS-1D 模型中生成 300 组土壤水数据。最后,基于模拟的土壤水数据利用去趋势波动分析法研究土壤水长程相关性。

1.3 去趋势波动分析法

Peng 等^[17]在 DNA 序列长程相关性研究中提出了去趋势波动分析法(detrended fluctuation analysis,DFA),DFA 方法可识别出非平稳的时间序列,能有效剔除外部趋势导致的伪自相似性现象,准确地分析土壤水长程相关性。

在进行 DFA 分析之前,首先去除土壤水时间序列的季节性趋势,保证计算结果的准确性。研究^[18]证明,对于具有明显的季节性周期或者年循环的时间序列,利用平均值去除法(average removing method,ARM)效果较好,故本文选用此方法,其计算公式为:

$$\varphi_k = \gamma_k - \overline{\gamma_k}$$
(5)

式中: k 为日期; φ_k 为去除季节性趋势后的土壤水时间序列(cm^3/cm^3); γ_k 为原始土壤水时间序列(cm^3/cm^3); $\overline{\gamma_k}$ 为所有年份中每个日期的土壤水数据的均值(cm^3/cm^3)。

DFA 的计算过程为:

(1)计算累积离差,获得新序列 $y(t)$ 。
$$y(t) = \sum_{i=1}^t (\varphi(i) - \overline{\varphi})$$
(6)

式中: t 为时间序列长度, $t = 1, 2, \cdots, N$; $\overline{\varphi}$ 为序列 $\varphi(t)$ 的均值。

(2)区间分割,拟合局部趋势。把 $y(t)$ 分割为长

度相等、互不重叠的区间, j 为区间长度,实际代表的是时间尺度, M 为区间数量,是 N/j 的整数部分。用最小二乘法拟合每个划分区间的局部趋势 $y_j(t)$,拟合的时候可以选择不同的多项式阶数。

(3)去除局部趋势,获得波动函数。在新序列 $y(t)$ 的每个分割区间中减去局部趋势 $y_j(t)$,计算去除趋势后的序列的均方根,即为波动函数 $F(j)$ 。

$$F(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(t) - y_j(t))^2}$$
(7)

(4)改变区间长度 j ,重复过程(3),得到区间长度 j 与波动函数 $F(j)$ 的对应关系。

$$F(j) \propto j^h$$
(8)

对 $\log F(j)$ 和 $\log j$ 线性拟合,存在线性关系即证明原始时间序列具有长程相关性,其中 h 是由最小二乘法线性拟合得到的斜率值,称为 DFA 标度指数,标度指数 h 的取值区间表示不同的趋势变化特征。如果 $h = 0.5$,说明时间序列是独立同分布的随机序列,不存在长程相关性;如果 $h = 1.5$,说明原始时间序列的波动呈现分形布朗运动,存在长程相关性;如果 $0.5 < h < 1$ 或 $h > 1.5$,说明时间序列具有持续性,上升(或下降)的变化趋势将保持不变;如果 $0 < h < 0.5$ 或 $1 < h < 1.5$,表明时间序列存在反持续性,过去与将来的趋势相反。

2 结果与分析

2.1 土壤水时间序列的长程相关性

DFA 分析中一般将区间长度设置为 $4 < j < N/$

4, 本文的土壤水时间序列长度为 1 827 天, 为了计算结果的准确性, 最终将区间长度设置为 $10 < j < 398$ 天, 并以一阶多项式去除局部趋势。经波动函数 $\log F(j)$ 和区间长度 $\log j$ 线性拟合发现, 所有拟合直线的决定系数 R^2 在 $0.986 \sim 0.999$, 表明 $\log F(j)$ 和 $\log j$ 的线性相关性显著。以其中 1 组土壤水数据

分析结果为例, 图 1 为湿润、半干旱、干旱气候区黏壤土质地地下土壤水时间序列的 DFA 分析结果, 拟合直线的斜率即为标度指数, 由图 1 可知, 10, 50 cm 深度 $\log F(j)$ 和 $\log j$ 的线性拟合度均较高, 决定系数 R^2 在 $0.994 \sim 0.997$, 表明线性关系显著, 计算结果可用于后续分析。

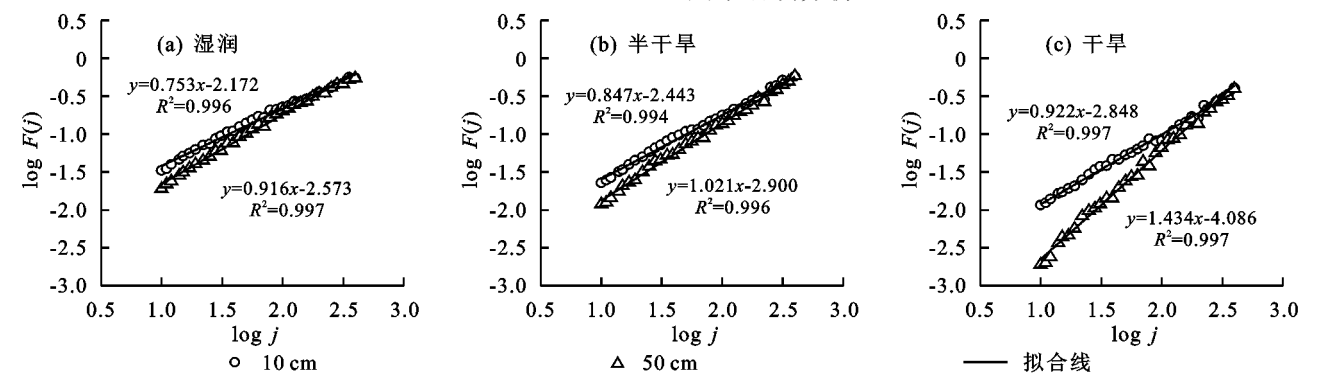


图 1 湿润、半干旱、干旱气候区黏壤土质地不同深度土壤水时间序列去趋势波动分析

由土壤水时间序列的标度指数小提琴图(图 2)可知, 在研究的时间尺度内(10~398 天), 各气候条件与不同土壤水力参数组合下生成的土壤水标度指数在 0.570~1.915, 表明模拟的土壤水序列中存在明显的长程相关性, 与前人^[5-6]基于观测数据的研究结果一致, 证明土壤水在时间尺度上具有长期记忆性, 后期的土壤水包含前期的土壤水记忆。

深度的增加, 标度指数均值逐渐增大(图 2), 表明土壤水的长程相关性随着土层深度不断增强。从具体数值(图 1)来看, 在黏壤土中, 3 个气候区 10 cm 深度的土壤水标度指数分别为 0.753, 0.847, 0.922; 50 cm 深度的土壤水标度指数分别为 0.916, 1.021, 1.434, 50 cm 深度的标度指数均大于 10 cm 深度。土壤水长程相关性与深度的一致变化规律表明浅层的土壤水与外界交互作用更强, 从分形维数的角度可以得到一致的结论。

分形维数(D)可以定量描述土壤水时间序列的分形特征, 表明土壤水动态变化的复杂程度。分形维数越小, 说明土壤水序列波动过程越简单。根据分形维数(D)与标度指数(h)的关系($D = 2 - h$), 标度指数越大, 分形维数越小^[7]。因此, 50 cm 深度的土壤水时间序列分形维数较小, 变化较稳定, 从而表明深层土壤水受外界因素影响更弱。

2.1.2 不同质地的土壤水长程相关性特征 由图 2 可知, 当气候条件和土层深度相同时, 在 3 个气候区, 黏壤土中土壤水标度指数的均值均大于砂土, 说明黏壤土的土壤水长程相关性更强。比如, 湿润气候区, 砂土中的土壤水标度指数均在 0.5~1, 而黏壤土中土壤水标度指数最大可达 1.598, 此处的土壤水时间序列波动接近分形布朗运动, 具有强长程相关性。此外, 砂土中土壤水标度指数在 0.5~1 的占比为 89.3%, 黏壤土中土壤水标度指数在 0.5~1, 1~1.5 的占比分别为 42.0%, 48.3%, 说明土壤水时间序列主要为平稳时间序列($h < 1$), 但是砂土中土壤水时间序列主要表现出持续性, 而黏壤土中土壤水时间序列持续性和反持续性均表现明显, 这表明砂土中的土壤水变化趋势更具有有一致性, 但黏壤土中前后期土

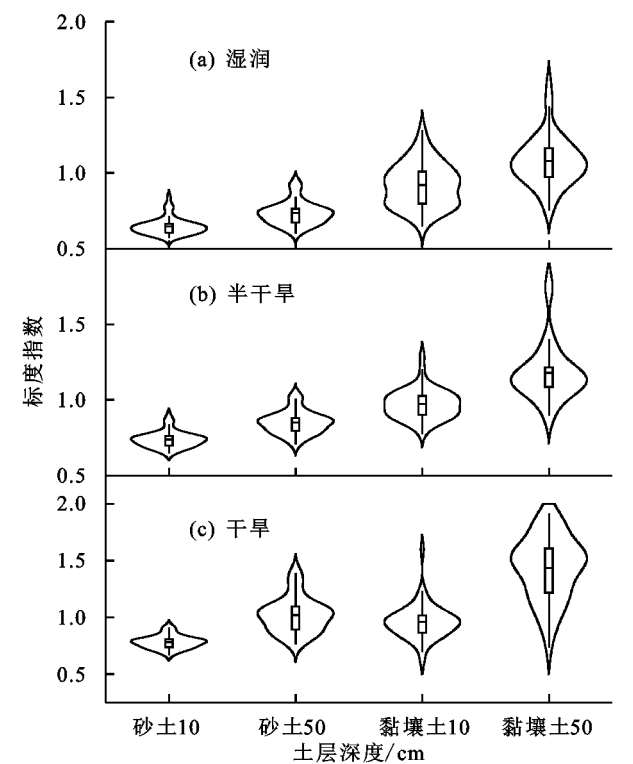


图 2 不同气候条件和土壤水力参数组合下不同深度的土壤水标度指数

2.1.1 不同土层深度的土壤水长程相关性特征 标度指数越大, 表明土壤水的长程相关性越强。从所有数据的统计结果可知, 在不同气象条件下, 随着土层

壤水变化相关性更强(h 更大)。分析表明,土壤质地显著影响土壤水的长期变化,而黏粒含量高更有利于土壤水变化预测。

2.1.3 不同气候区的土壤水长程相关性特征 由图 2 可知,在 3 个气候区,随干旱指数的增大,土壤水标度指数有增加的趋势(表 1)。具体表现在砂土 50 cm 深度,湿润、半干旱和干旱气候区标度指数均值依次增大,分别为 0.734,0.851,1.021;黏壤土 50 cm 深度,干旱气候区土壤水标度指数集中分布在 1.5 左右,且该气候区土壤水标度指数最大为 1.915,表明该区域的土壤水状态稳定,持续性强,而湿润和半干旱气候区土壤水标度指数分别集中分布在 1.0,1.1 左右,明显小于干旱气候区的土壤水标度指数,而且黏壤土中土壤水标度指数随气候变干而增加的趋势更加明显。分析结果表明,一方面干旱气候增强了土壤水变化的记忆性;另一方面,在气候对土壤水长期变化有显著影响的情况下,土壤质地的影响仍然较为明显。

2.2 影响土壤水长程相关性的土壤水力参数

由于 K_s 呈对数正态分布,因此本研究取 $\log K_s$ 分析。由表 3 可知,各水力参数对土壤水长程相关性均有显著影响,湿润、半干旱、干旱气候区的土壤水标

度指数与 n 、 α 和 $\log K_s$ 的相关性最强,与 θ_r 和 θ_s 的相关性均较弱,且标度指数与 n 、 $\log K_s$ 呈显著负相关关系,而与 α 在湿润和半干旱气候区呈显著负相关性,在干旱气候区则呈显著正相关性。从土壤质地类型来看,在黏壤土中,半干旱和干旱气候区,10 cm 深度的土壤水标度指数与 α 的相关性最强,相关系数分别为 $R = -0.602 (P < 0.01)$, $R = 0.599 (P < 0.01)$,而 50 cm 深度的土壤水标度指数与 $\log K_s$ 的相关性最强,相关系数分别为 $R = -0.567 (P < 0.01)$, $R = -0.564 (P < 0.01)$,表明 α 和 K_s 都是影响半干旱和干旱气候区土壤水长程相关性的主要水力参数;在湿润气候区,不同深度的土壤水标度指数与 α 的相关性均最强,相关系数分别为 $R = -0.734 (P < 0.01)$ 、 $R = -0.496 (P < 0.01)$,表明在该气候区土壤水长程相关性主要受 α 的影响。在砂土中,所有气候区土壤水标度指数与 n 的相关系数均最大,因而在砂土中, n 对土壤水长程相关性影响最显著。由此可见,土壤水力参数对土壤水动态变化的影响依据气候区的差异而变化,尤其在较干旱的气候区,水力参数的影响更为复杂,而且不同质地的土壤水力参数对土壤水长程相关性的控制不同。

表 3 土壤水标度指数与土壤水力参数的斯皮尔曼相关系数

土壤水力 参数	湿润气候区				半干旱气候区				干旱气候区			
	砂土		黏壤土		砂土		黏壤土		砂土		黏壤土	
	10 cm	50 cm	10 cm	50 cm	10 cm	50 cm	10 cm	50 cm	10 cm	50 cm	10 cm	50 cm
θ_r	0.097	0.066	-0.269	-0.425 **	0.078	0.037	-0.315 *	-0.419 **	0.052	0.031	-0.377 **	-0.446 **
θ_s	0.304 *	0.351 *	0.319 *	0.368 **	0.299 *	0.354 *	0.337 *	0.353 *	0.308 *	0.389 **	0.326 *	0.435 **
α	0.039	0.151	-0.734 **	-0.496 **	0.201	0.254	-0.602 **	-0.331 *	0.326 *	0.271	0.599 **	0.357 *
n	-0.887 **	-0.855 **	-0.017	0.158	-0.904 **	-0.836 **	0.014	0.151	-0.864 **	-0.786 **	0.063	0.140
$\log K_s$	-0.517 **	-0.650 **	-0.091	-0.456 **	-0.600 **	-0.699 **	-0.198	-0.567 **	-0.672 **	-0.740 **	-0.507 **	-0.564 **

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 土壤水长程相关性特征

本研究表明,土壤水长程相关性与土层深度、黏粒含量和干旱指数存在正相关关系。以往研究中存在类似的结论,高雄飞等^[6]、Zhang 等^[19] 基于原位观测的土壤水数据发现,土壤水长程相关性随着土层深度的增加而增强;Martínez—Fernández 等^[9] 研究中发现,土壤水记忆性与黏粒含量呈明显的正相关关系;Mc Coll 等^[3] 研究发现,干旱气候区的土壤保水能力更强。本研究中影响土壤水变化的主要因素有降雨、蒸散发和土壤质地,10 cm 深度的土壤对降雨的反应强烈,而且是蒸散发极其活跃的土层,在降雨补给后,蒸散发也会带走大量的土壤水,从而对后期土壤水的影响较小;而深层土壤水蒸散发减弱,贮水量还与前期的上层土壤水有关,因此,序列波动幅度

更小,土壤水长程相关性更强^[20]。在干旱气候区,年均降雨量很少,仅有 187.880 mm,蒸散发受到水分限制,而且土壤水力传导系数减小,从而土壤水处于比较稳定的状态^[3]。在土壤质地中,粒径分布直接影响土壤的持水性,当砂粒含量高时,土壤中的小孔隙减少,土壤颗粒的吸附能力减弱,因此,黏粒含量高的土壤持水性更强,土壤水的动态变化更为稳定^[4]。

另外,已有研究^[5,7-8] 发现,土壤水长程相关性存在标度指数“拐点”,即土壤水变化趋势随时间尺度增大而发生突变,但是本研究并未出现类似特征,可能是因为基于实测数据的土壤水影响因素复杂,而本研究的因素较为单一,这也表明土壤水长期演变的复杂机制。

3.2 影响土壤水长程相关性的主要土壤水力参数

明确土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响

有利于从机理上认识土壤水的时间尺度变异,改进关于土壤水分预测的模型。本研究表明, n 、 α 、 K_s 是控制土壤水长时间尺度变化的主要水力参数,毕彪等^[21]研究也表明, n 、 α 、 K_s 对土壤水分动态分布影响较大。水力参数对土壤水长程相关性的影响与土壤持水性和导水性有关,其影响因气候条件和土壤质地而异。 n 反映土壤中的孔隙分布, n 越大,土壤孔隙越大,土壤持水性越弱^[22]。本研究发现,仅在砂土中 n 显著减弱土壤水长程相关性,这是因为砂土的 n 明显大于黏壤土,当 n 增大时,土壤持水性减弱,因此,前期土壤水对后期土壤水的影响减弱。Wang^[23]在半干旱地区也得到类似的结论,但是 θ_r 的影响强于 n ,而本研究在砂土中 θ_r 的影响不显著,这可能与气候区的差异相关,降雨和土壤质地都是影响土壤水变异性的的重要因素。 α 与土壤粒径密切相关,土壤粒径越细, α 值越小,表明土壤的持水性能越好^[24]; K_s 能够表征土壤入渗能力,胡传旺等^[25]证实了黏粒含量与 K_s 呈负相关,黏粒可以吸附水分和发生膨胀,从而阻塞土壤中的孔隙,减少水分下渗,因此,在黏壤土中, α 和 K_s 可以显著影响土壤水长程相关性。此外,本研究中表层土壤无植被覆盖,在半干旱和干旱气候区土壤比较干燥,对于降雨的响应更迅速,水分下渗更多, K_s 的作用更明显,因此,在该气候区 K_s 对土壤水的影响强于湿润气候区。

4 结论

(1)模拟的土壤水序列中存在显著的长程相关性,土壤质地会影响土壤水变化趋势。在砂土中,土壤水以持续性为主;在黏壤土中,持续性和反持续性均较为明显。

(2)土层深度、黏粒含量和干旱指数同时影响土壤水长期变化,与标度指数均为正相关关系。

(3)土壤水长程相关性的主控水力参数随气候条件和土壤质地改变。砂土中 n 是主要因子,黏壤土中 α 和 K_s 是主要因子,且 K_s 的作用在半干旱和干旱气候区更明显。

参考文献:

[1] 陶吉杨,谭军利,魏童,等.宁南山区不同植被退耕林地及其坡位的土壤水分时空分布特征:以骆驼山流域为例[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):216-222.

[2] 李雨芊,孟玉川,宋泓苇,等.典型林区水分氢氧稳定同位素在土壤-植物-大气连续体中的分布特征[J].应用生态学报,2021,32(6):1928-1934.

[3] Mc Coll K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J].Nature Geoscience,2017,10(2):100-104.

[4] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.科尔沁不同类型沙丘土壤

水分时空变化特征及其环境影响因子[J].水土保持学报,2020,34(6):125-134,142.

[5] 宋闰柳,于静洁,刘昌明.基于去趋势波动分析方法的土壤水分长程相关性研究[J].水利学报,2011,42(3):315-322.

[6] 高雄飞,刘元会,郭建青,等.基于去趋势波动分析法的土壤含水量变化特性研究[J].土壤,2015,47(1):188-191.

[7] Shen S, Ye S J, Cheng C X, et al. Persistence and corresponding time scales of soil moisture dynamics during summer in the Babao River Basin, Northwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(17):8936-8948.

[8] Zhang T, Shen S, Cheng C X, et al. Long-range correlation analysis of soil temperature and moisture on A'rou hillsides, Babao River basin[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2018,123(22):12606-12620.

[9] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Almendra-Martin L. Soil moisture memory and soil properties: An analysis with the stored precipitation fraction[J].Journal of Hydrology,2021,593:125622-125631.

[10] 牛晓倩,贾小旭,刘成功,等.关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟[J].水土保持学报,2021,35(1):198-204.

[11] Zhang Y, Schaap M G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3)[J].Journal of Hydrology,2017,547:39-53.

[12] 李冰冰,王云强,李志.HYDRUS-1D 模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.

[13] 刘彬彬,刘尧兵,张科锋.基于 HYDRUS-1D 的不同质地土壤入渗过程数值模拟[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):140-145.

[14] Sayah B, Gil-Rodríguez M, Juana L. Development of one-dimensional solutions for water infiltration. Analysis and parameters estimation[J].Journal of Hydrology,2016,535:226-234.

[15] Wang T, Franz T E, You J, et al. Evaluating controls of soil properties and climatic conditions on the use of an exponential filter for converting near surface to root zone soil moisture contents[J].Journal of Hydrology,2017,548:683-696.

[16] Long H Y, Shuai X F, Lei Q L, et al. Spatiotemporal distribution of calibration coefficients of hargreaves equation for estimating potential evapotranspiration in Mainland China[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2013,139(4):293-299.

[17] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides[J].Physical Review E,1994,49(2):1685-1689.

- 分来源[J].干旱区研究,2018,35(5):1146-1152.
- [8] Liu Z Q, Jia G D, Yu X X. Water uptake and WUE of Apple tree-Corn Agroforestry in the Loess hilly region of China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 234:e106138.
- [9] Chen G, Liu S B, Xiang Y Z, et al. Impact of living mulch on soil C : N : P stoichiometry in orchards across China: A meta-analysis examining climatic, edaphic, and biotic dependency[J].Pedosphere,2020,30(2):181-189.
- [10] Wang Y J, Liu L, Tian Y L, et al. Temporal and spatial variation of soil microorganisms and nutrient under white clover cover[J].Soil and Tillage Research,2020, 202:e104666.
- [11] 何春霞,陈平,孟平,等.华北低丘山区果药复合系统种间水分利用策略[J].植物生态学报,2016,40(2):151-164.
- [12] 李同川,李会科,郭宏,等.渭北黄土高原果园生草地旱季土壤水分特征研究[J].水土保持研究,2014,21(1): 29-33,38.
- [13] 张先来,李会科,张广军,等.种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J].西北林学院学报, 2005,20(3):56-59.
- [14] 赵政阳,李会科.黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分的影响[J].园艺学报,2006,33(3):481-484.
- [15] 曹铨,王自奎,沈禹颖.陇东苹果园生草复合体系土壤水分季节动态[J].干旱区研究,2019,36(1):77-84.
- [16] 郭复兴,常天然,林瑒焱,等.陕西不同区域苹果林土壤水分动态和水分生产力模拟[J].应用生态学报,2019, 30(2):379-390.
- [17] Palese A M, Vignozzi N, Celano G, et al. Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard[J].Soil and Tillage Research,2014,144:96-109.
- [18] Tao Z, Neil E, Si B C. Determining deep root water uptake patterns with tree age in the Chinese loess area [J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: e106810.
- [19] 王锐,刘文兆,宋献方.黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3): 134-137,184.
- [20] 徐英德,汪景宽,高晓丹,等.氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J].水土保持学报,2018,32 (3):1-9,15.
- [21] María P, Coomans O, Urcelay C, et al. Isotope fractionation during root water uptake by *Acacia caven* is enhanced by arbuscular mycorrhizas [J]. Plant Soil, 2019,441(1/2):485-497.
- [22] 刘柯渝.深层土壤水对黄土塬区苹果蒸腾的贡献[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [23] Gao X D, Liu Z P, Zhao X N, et al. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,265:444-453.
- [24] Wang S F, An J, Zhao X N, et al. Age-and climate-related water use patterns of apple trees on China's Loess Plateau [J].Journal of Hydrology,2020,582:e124462.
- [25] 王小龙,刘凤之,史祥宾,等.行内生草对葡萄根系生长和土壤营养状况的影响[J].华北农学报,2018,33(增刊 1):230-237.
- (上接第 85 页)
- [18] Zhang Q, Zhou Y, Singh V P, et al. Comparison of de-trending methods for fluctuation analysis in hydrology[J]. Journal of Hydrology,2011,400(1/2):121-132.
- [19] Zhang T, Shen S, Cheng C X. Impact of radiations on the long-range correlation of soil moisture: A case study of the A'rou superstation in the Heihe River Basin[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(9): 1491-1506.
- [20] 王贺年,余新晓.北京山区林地土壤水分时间序列分析 [J].山地学报,2012,30(5):550-554.
- [21] 毕彪,钱云楷,艾宪峰,等.基于 HYDRUS-1D 模拟的降雨入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J].长江科学院院报,2021,38(7):36-41.
- [22] 牛晓彤,刘目兴,易军,等.三峡山地土壤水分特征曲线及模型拟合[J].灌溉排水学报,2017,36(9):75-80.
- [23] Wang T. Modeling the impacts of soil hydraulic properties on temporal stability of soil moisture under a semi-arid climate[J].Journal of Hydrology,2014,519: 1214-1224.
- [24] 陈卫金,程东会,陶伟.Van Genuchten 模型参数的物理意义[J].水文地质工程地质,2017,44(6):147-153.
- [25] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.