DOI: 10.5846/stxb202008272223

陈维梁,王树学,齐统祥,焦磊,王聪,买尔当·克依木,李宗善,傅伯杰.黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性. 生态学报,2021,41(14):5643-5657.

Chen W L, Wang S X, Qi T X, Jiao L, Wang C, Maierdang Keyimu, Li Z S, Fu B J.Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture at black locust plantations with different restoration years on hilly region of the loess plateau, China.Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14):5643-5657.

黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动 态及其时间稳定性

陈维梁^{1,2},王树学³,齐统祥³,焦 磊⁴,王 聪¹,买尔当·克依木¹,李宗善^{1,2,*}, 傅伯杰^{1,2}

1 城市与区域生态国家重点实验室,中国科学院生态环境研究中心,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

3 陕西省吴起县退耕还林工程管理办公室,延安 717600

4 陕西师范大学, 西安 710119

摘要:以空间代时间的方法研究不同恢复年限对人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性的影响,对于了解人工刺槐林在 生态恢复过程中的土壤水分动态特征具有重要意义。基于长期定位观测,选取黄土丘陵沟壑区 15、20、30、35 a 等4个恢复年限 人工刺槐林,自 2014 年 5 月至 2018 年 10 月每年生长季(5—10 月)开展土壤水分自动观测。研究结果如下:(1)不同恢复年限 刺槐林土壤水分差异显著,刺槐林土壤储水量随恢复年限增加呈现先增加后降低的趋势,排序依次为 30 a(184.9 mm)>20 a (184.6 mm)>35 a(150.8 mm)>15 a(128.8 mm);不同恢复年限刺槐林土壤水分的时空分布特征差异明显,土壤水分变异性随 土层增加而降低,但不随恢复年限而有规律的变化;土壤水分主要受到降水以及植被生长的影响,其变异性的时空格局也说明 随土壤深度增加土壤水分的稳定性随之增加;(2)通过相对差分分析不同恢复年限刺槐林土壤水分时间稳定性,确定 15、20、 30、35 a 的代表深度分别为 80、100、80、150cm 土层,都属于与 100cm 相近的土壤深度;(3) Spearman 秩相关分析显示,上土层与 下土层的土壤水分的时间稳定性特征差异明显;(4)线性回归与纳什系数结果表明通过相对差分与时间稳定性指数得到土壤 水分代表深度的结果是可接受的,其中 15 a 恢复年限刺槐林的结果最好,决定系数 R²和纳什系数 NSE 分别可达 0.91 和 0.82, 但总体结果仍存在误差,在区域土壤水分模拟时需考虑这一不确定性。(5)灰色关联分析表明,土壤质地(砂粒),土壤总氮、土 壤容重、土壤有机碳、土壤总孔隙度以及坡度是不同恢复年限刺槐林土壤水分时间稳定性指数

Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture at black locust plantations with different restoration years on hilly region of the loess plateau, China

CHEN Weiliang^{1,2}, WANG Shuxue³, QI Tongxiang³, JIAO Lei⁴, WANG Cong¹, Maierdang Keyimu¹, LI Zongshan^{1,2,*}, FU Bojie^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

收稿日期:2020-08-27; 修订日期:2021-01-09

³ Administration Office of Project Management for GTGP of Wuqi County, Shannxi Province, Yan'an 717600, China

基金项目:国家十三五重大研发计划项目(2016YFC0501602);国家自然科学基金项目(41877539)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zsli_st@ rcees.ac.cn

4 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Black locust (Robinia pseudoacacia) are widespread across the Loess Plateau of China. It's of great importance for understanding the variation of soil water in black locust plantations under restoration to study dynamic of soil water in black locust plantations with different restoration years and it's temporal stability by the substitution of space for time with restoration time going. Based on long-term in-situ observation of soil moisture in growing season from May 2014 to October 2018, relative difference and Spearman rank correlation analysis were used to study the temporal stability of soil water in 15 a, 20 a, 30 a and 35 a black locust plantations. Results showed that (1) the soil water storage of black locust plantations with different restoration years was significantly different, the soil water storage increased first and then decreased, with the increase of restoration years, and the order was 30 a (184.9 mm)>20 a (184.6 mm)>35 a (150.8 mm)>15 a (128.8 mm). As soil depth deepened, soil water decreased with the increase of soil depths, but does not change regularly with restoration years; results indicates that soil moisture is mainly affected by precipitation and vegetation growth, and its spatiotemporal distribution patterns of variability (CV, Coefficient of Variation) also indicates that stability of soil moisture increased with soil depth increasing accordingly; (2) Temporal stability of soil moisture was established by relative difference analysis and index of temporal stability at black locust plantations with different restoration years, the representative depths of 15 a, 20 a, 30 a and 35 a were 80 cm, 100 cm, 80 cm and 150 cm soil depth, respectively, which were all close to 100 cm soil depth; (3) Spearman rank correlation analysis shows that the upper and lower soil layers have their own time stability pattern; (4) The results of linear regression and Nash-coefficient show that it is acceptable to obtain the representative depth of soil water by relative difference and index of temporal stability, but there are some uncertainties remained, which should be taken into account in the further region soil water simulation study. (5) Results of Grey relational analysis shows that soil texture (Sandy), soil total nitrogen (STN), soil bulk density (BD), soil organic carbon (SOC), soil total porosity (STP) and slope degree are the major influencing factors on time stability of soil moisture at different restoration years which indicates that the spatiotemporal dynamics of soil moisture are influenced by heterogeneity of environmental factors. The results may provide theoretical reference and scientific basis for further ecological civilization construction in the Yellow River Basin.

Key Words: restoration years; black locust plantation; soil water storage; temporal stability; index of temporal stability

黄土高原属干旱半干旱地区,土壤水分是该地区植物水分的主要来源,是维持干旱半干旱地区生态系统的主要限制因素,是控制生态系统结构的关键因素,在土壤-植被-大气系统物质与能量转化中起着核心和纽带的重要作用^[1]。近年来,随着黄土高原植被建设等生态工程的不断推进,以刺槐(Robinia pseudoacacia)人工林为代表的植被受到土壤水分的限制作用日益明显,尤其是大面积人工林出现较为显著的土壤干燥化现象^[2-4],严重影响黄土高原陆地水循环过程。因此人工林土壤水分时空动态、生态水文过程等研究成为近二十多年来黄土高原水循环研究的重点关注方向^[5-8]。

土壤空间异质性及气候等环境因素决定土壤水分具有显著的时空变异性。国内外对于土壤水分空间变 异性的研究已数不胜数^[9+12]。通过研究土壤水分的时间动态变化特征来表征可靠且稳定的土壤水分空间分 布特征,需要大量的野外监测,为了保证土壤水分时空分布特征具有代表性,同时又可减少大量的野外工作量 是前人研究土壤水分的重点之一。Vachaud 等^[13]发现土壤水分的空间分布随时间的变化很小,并且某一监 测点的土壤水分可代表研究区的平均状况,这一现象被定义为土壤水分空间分布在时间上的稳定性,并得到 广泛研究和应用。近些年,国内外对土壤水分时间稳定性的关注度相继增加^[14-15]。Gomez Plaza 等^[16]研究发 现地形是半干旱地区土壤水分时间稳定性的主要影响因素;白一茹等^[14]在黄土高原雨养区研究发现干旱条 件下的稳定性比湿润条件下更强;冉有华等^[17]在黑河流域发现土壤水分时间稳定性程度在不同深度表现程 度不同,表层最不稳定,并且 40 cm 深度以下基本稳定;Hu 等^[18]通过研究黄土高原土壤储水量的时间稳定 性,发现可以利用一个点的土壤储水量代表区域的平均值作为代表值。从不同水平尺度^[18-20],到垂直尺度土 壤水分时间稳定性^[5,15];同时有研究人员利用土壤水分时间稳定性这个特性来估算能够代表某区域尺度土 壞水分的点位和深度^[20-21],关于不同植被类型下^[22-23]以及喀斯特裸岩区^[24]土壤水分时间稳定性也已有报道。 随着刺槐人工林恢复时间的增加,其土壤水分的时间稳定性差异又是如何,相关研究还鲜有报道。

在典型黄土丘陵沟壑区小流域内,基于对不同植被类型、土地利用下的土壤水分进行长时间序列原位观测(in-situ observation)已取得重要进展,但在不同恢复年限的人工林土壤水分垂直分布上的时间稳定性鲜有报道。对此,本研究以2014—2018年5年期间的生长季(5—10月)对羊圈沟小流域内15、20、30、35 a等不同恢复年限人工刺槐林0—180 cm 深度剖面的土壤水分进行实时观测,研究不同恢复年限人工刺槐林土壤水分的时空分布特征,通过平均相对偏差(Mean relative deviation, MRD)和 Spearman 秩相关系数分析土壤含水量的时间稳定性特征,了解不同深度土壤含水量时间稳定性差异性,并确定不同恢复年限刺槐林土壤水分的代表深度,采用线性回归与纳什系数对所得结果进行评估,并采用灰色关联分析(Grey relational analysis, GRA)进一步筛选确定土壤水分时间稳定性的主要影响因素,有助于理解半干旱区人工林土壤水文过程,为该区不同恢复年限刺槐林土壤水分监测点布设和墒情模拟估算预测提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区是位于陕西省延安市宝塔区的羊圈沟小流域(36°42′6.20″N, 109°31′2.65″E),面积约 2.02 km²,海 拔约 1050—1295 m,是典型的黄土丘陵沟壑区(图 1)。该区属暖温带大陆性季风气候,年均降雨量(MAP)约



图 1 羊圈沟小流域与样地地理位置及样地布设示意图 Fig.1 Location of Yangjuangou Catchment and schematic diagram of plot setup

528.9 mm,年内降水分布不均,主要集中于7—9月,其中超过80%的降水发生在5—10月(图2),多年平均水 面蒸发量为898—1068 mm;年平均气温约9.8 ℃,气温年较差29.4 ℃,≥10 ℃的活动积温约2500—3400 ℃, 多年平均无霜期140—165 d,多年平均日照时数2528.8 h,多年平均太阳总辐射量5800 KJ/cm²。该小流域的 植被以分布在退耕坡地的刺槐人工林、果树、灌木、退耕草地以及沟谷的农作物为主。根据当地多数物种的生 长物候特征,定义5—10月为羊圈沟小流域植被的生长季,生长季多年平均气温为20 ℃。该小流域长期受到 人类活动干扰,原有自然植被受到严重破坏,经过多年退耕还林等生态恢复工程实施,逐渐形成以人工植被和 自然恢复的次生植被为主的植被分布格局。其中乔木以刺槐、山杏(Prunus armeniaca),灌木以沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens* Turcz)以及白刺花(*Sophora davidii*(Franch.)*Skeels*)等, 草本以包括铁杆蒿(*Artemisia sacrorun*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)和杠柳(*Periploca sepium*)为优势群落。1980 年初,刺槐作为退耕还林树种逐渐在退耕坡地上栽植,经过30多年的生态恢复,目前刺槐林约占羊圈沟小流 域超过50%的面积。小流域的土壤主要是约50—200 m 厚度的黄绵土,孔隙度约为50%,易造成水土流失。 小流域田间持水量(field capacity,FC)和萎蔫系数(wilting point, WP)分别为20%—24%和3%—6%。



图 2 羊圈沟小流域 1990—2018 年年均降水与 2014—2018 年月均降水分布情况 Fig.2 Distribution of annual and monthly precipitation during 1990—2018 and 2014—2018 in Yangjuangou Catchment

1.2 样地设置

在典型丘陵沟壑区羊圈沟小流域选择 15、20、30、35 a 等 4 个不同林龄的刺槐林代表 4 个不同恢复年限(图 1),于 2013 年 4 月安装土壤水分实时观测系统,同时开展样地调查(表 1)。在每个刺槐人工林划定 20 m×20 m 见方作为样地,在样地中心挖一个深 2 m 的土坑,分别在同一侧剖面的 10、20、40、60、80、100、120、 150 和 180 cm 共计 9 个土壤深度(图 1)安装土壤水分传感器(EC—5, Decagon Devices, Pullman, WA, USA)进行实时观测土壤体积含水量(Soil volumetric water content, SVWC, m³/m³),安装完传感器后对土坑进行回填,并尽量保证回填后的表层与周围地表相近。每个土壤水分传感器用 Hobo 数据采集器(HOBO—21,Onset, Cape Cod,MA,USA)进行每隔 60 s 测定,30 min 间隔记录数据。在小流域中咀峁山顶的开阔处距离地面 2 m 处安装翻斗式雨量计(TE525, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 对降雨进行与 SVWC 同步 30 min 间隔观测。

Table 1 Characteristics of black focust planations plots at universit restoration years in ranginangou catchinent							
参数 Parameters of sites	样地 1 Plot1	样地 2 Plot2	样地 3 Plot3	样地 4 Plot 4			
样地面积 Area/m ²	10×10	10×10	10×10	15×10			
坡向 Slope aspect	S	S	Е	NW			
坡度 Slope degree/(°)	26	26	24	21			
平均胸径 Mean DBH/cm	5.59 ± 1.66	10.85 ± 4.26	11.76±4.38	20.12±7.14			
平均树高 Mean tree height/m	6.94±1.80	8.82±2.37	8.93±1.63	10.37 ± 2.05			
林龄 Age/a	15	20	30	35			
林分密度 Tree density/(tree/hm ²)	2500	1300	1200	600			
林下植被物种 Species of understory	长茅草+悬钩子	长茅草+悬钩子	铁杆蒿+杠柳	土庄绣线菊			
林下植被盖度 FCV of understory/%	35	35	45	90			
土壤容重 Bulk Density/(g/cm ³)	1.34	1.27	1.35	1.33			
土壤总孔隙度 Total porosity/%	50.24	52.69	50.06	50.99			
黏粒 Clay/%	5.32	5.44	5.47	4.05			
粉粒 Silt/%	38.42	37.48	38.53	29.72			
砂粒 Sand/%	56.26	57.08	56.00	66.23			
土壤有机碳 SOC/(g/kg)	3.27	3.26	2.73	3.08			
土壤总氮 STN/(g/kg)	0.36	0.33	0.32	0.34			
饱和导水率 Ks/(mm/min)	0.16	0.31	0.12	0.20			
田间持水量 FC/%	12.11	18.87	16.77	15.86			

表 1 羊圈沟小流域不同退耕年限人工刺槐林样地的立地条件 Table 1 Characteristics of black locust plantations plots at different restoration years in Yangjuangou Catchment

DBH 为胸径, Diameter at breast height;林龄以退耕年限为标准; FCV 为植被覆盖度, Fraction coverage of vegetation; FC, Field capacity; SOC, Soil organic carbon; STN, Soil total nitrogen

1.3 土壤属性测定

于 2013 年 4 月土壤水分观测系统安装时同步采集土壤样品用于土壤理化参数测定。在每个样地每个土 壤水分传感器安装处所对应的土层用体积为 100 cm³的不锈钢环刀各采集 3 个原状土样品,用于土壤容重、土 壤孔隙度、田间持水量、饱和导水率等土壤水力特征;以及 3 个装于自封袋的土样用于测定土壤质地、土壤有 机碳、土壤总氮等(表 1),测定方法见^[25]。

1.4 土壤水分时间稳定性

1.4.1 土壤储水量计算

土壤储水量即一定单位体积内土壤水分的储存量,本研究根据所观测深度 0—180 cm 土壤深度为准,估 算 0—180 cm 土壤深度单位体积的土壤储水量,计算公式为:

$$SWS_i = \sum_{i=1}^{9} SVWC_i d_i$$
⁽¹⁾

$$\overline{\text{SVWC}}_{j} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{9} \text{SVWC}_{ij}$$
(2)

式中,SWS_{*i*}为*i*测点 0—180 cm 土壤剖面储水量(soil water restorage, mm),SVWC_{*i*}为土壤体积含水量,m³/m³, d_i 为土壤深度,mm,9为本研究所观测的土层数量, $\overline{SVWC_j}$ 为*j*时刻的平均土壤体积含水量,m³/m³。 **1.4.2** 相对差分

根据 Vachaud 等的研究,各观测点的平均相对偏差(Relative difference, RD)和标准偏差(Standard Deviation, SD)能够描述土壤水分的时间稳定性特征。j时间任意观测点i的 SWS_{ij}的相对偏差 RD_{ij} 和 SD 可由 公式(3)、(4)计算得出:

$$RD_{ij} = \frac{\text{SVWC}_{ij} - \text{SVWC}_{j}}{\overline{\text{SVWC}_{i}}}$$
(3)

式中,SVWC_{ii}为 i 观测点_i时间的 SVWC,m³/m³; SVWC_i 为 j 时间的平均 SVWC;m 为测定次数。

平均相对差分 MRD,及其对应的标准偏差 SDRD,的计算如下:

$$MRD_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m RD_{ij}$$
(5)

$$\text{SDRD}_{i} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m} (RD_{ij} - \text{MRD}_{i})^{2}}$$
 (6)

1.4.3 时间稳定性指数

根据 Zhao 等^[26]的研究,通过比较不同土壤深度的时间稳定性指数(Index of temporal—stability at depth i, ITSD_{*i*})来比较不同恢复年限刺槐林不同土壤深度的土壤水分时间稳定性,找出时间稳定性最高的观测点,该观测点可代表平均土壤水分状况,ITSD_{*i*}计算如公式(7):

$$ITSD_{i} = \sqrt{MRD_{i}^{2} + SDRD_{i}^{2}}$$
(7)

1.4.4 Spearman 秩相关系数

Spearman 秩相关系数 r_s是用来分析在 2014—2018 年生长季不同观测点的秩随时间变化的稳定性,由公式(8)计算:

$$r_{s} = 1 - 6\sum_{i=1}^{n} \frac{(R_{ij} - R_{il})^{2}}{n(n^{2} - 1)}$$
(8)

式中, R_{ij} 是土壤水分 θ_{ij} 的在i测点j时刻的秩, R_{il} 为i测点l时刻的秩,n为观测点的总数。 r_{s} 越接近1,说明观测点i的 θ 在j和l时刻具有越强的稳定性。

1.5 数据分析

1.5.1 变异程度

随机变量的离散程度,即变异性的大小,可用变异系数(Coefficient of Variation, CV,%)的大小来反映,具体计算公式为:

$$CV = 100 \times SD / \overline{SVWC}_{ij}$$
 (9)

式中,SD 为标准差, SVWC_{ii} 为平均 SVWC, m³/m³。

根据 Nielsen 等^[27]的方法对离散程度即变异程度进行分级:*CV*<10%为弱变异性;10%≤*CV*≤100%为中等变异性;*CV*≥100%为强变异性。

1.5.2 决定系数与纳什系数

将整个测定期内某测点 *i* 的 SVWC 与不同深度土层的平均 SVWC 进行线性回归,利用决定系数(*R*²)说明二者间的差异,一般而言,*R*²越小,说明测点 *i* 的 SVWC 与该研究区平均 SVWC 的关系越密切,差异性越小。同时,本研究也采用纳什系数 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 对代表土壤深度能否代表本林分的土壤水分进行评价,公式如下:

NSE = 1 -
$$\frac{\sum_{i=1}^{T} (SVWC_{ij} - SVWCR)^{2}}{\sum_{i=1}^{T} (SVWC_{ij} - \overline{SVWC}_{i})^{2}}$$
(10)

式中,SVWC_{ij}指*i* 土层*j*时刻的土壤体积含水量,m³/m³,SVWC_R指代表土壤深度的土壤体积含水量,SVWC_i 表示观测值的总平均。NSE 的取值为-∞—1,NSE 越接近1,表示代表性越好,结果可信度越高;NSE 接近0, 表示代表点位的结果接近观测值的平均值水平,即总体结果可信,但误差大;NSE 远远小于0,则结果是不可 信的。

1.5.3 灰色关联分析

对于两个系统之间共有的影响因素,其随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度。 鉴于土壤水分的时间稳定性可能与植被特征和土壤性质等多种因素有关,采用灰度关联分析法(Grey relational analysis,GRA)来评估土壤与植被因子对土壤水分时间稳定性的影响,并确定在土壤水分空间格局 中对时间稳定性有贡献的主要因素。灰色关联分析是一种灰色预测方法,它可以通过处理有限的表面不规则 数据来发现系统本身的特征^[28],并被证明是解决不确定信息系统中各因素关联程度的有效工具^[29-31],具体步 骤及方法如下^[32]:

首先设置 $x_0(k)$ 为参考序列, $x_i(k)$ 为比较序列:

$$x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k))$$
(11)

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)) \qquad i = 1, 2, \dots, q$$
(12)

其次采用均值化对数据进行归一化处理,以确保各序列数据保持一致,计算方法如下:

$$x_{i}(k) = \frac{x_{i}(k)}{\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} x_{i}(k)}$$
(13)

归一化序列可表示为 x_i^* :

$$x_{i}^{*} = (x_{i}(1)^{*}, x_{i}(2)^{*}, \dots, x_{i}(k)^{*})$$
(14)

则 $x_0(k)$ 和 $x_i(k)$ 的灰色关联系数 $\xi i(k)$, 计算公式如(15):

$$\xi_{i}(k) = \frac{\min_{k} \min_{k} |x_{0}(k) - x_{i}(k)| + \rho \max_{i} \max_{k} |x_{0}(k) - x_{i}(k)|}{|x_{0}(k) - x_{i}(k)| + \rho \max_{i} \max_{k} |x_{0}(k) - x_{i}(k)|}$$
(15)

式中, ρ 称为分辨系数,值越小,分辨力越大,取值范围为[0,1],一般取 0.5。 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 称为 $x_0 = x_i = x_i = x_i$ 个指标(或时刻、空间)的绝对差; min min $|x_0(k) - x_i(k)|$ 和 max max $|x_0(k) - x_i(k)|$ 分别称为两级极小差 和两级极大差。随后可求出 $x_i(k)$ 与对应的 $x_0(k)$ 关联系数 $\xi i(k)$;

最后,计算得到关联度 εi:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{q} \xi_i(k) \tag{16}$$

灰色关联度取值范围在 0—1 之间,定量表明所考虑因素对客观值的影响。因此,主要影响因素所对应较高的灰色关联度,而影响较小的因子所对应中等灰色关联度,可忽略的影响因素所对应较低的灰色关联度^[30]。

本研究的数据处理统一采用 Excel 2019(Microsoft office, USA),方差分析采用 SPSS 20.0(IBM SPSS Statistics, USA),数据制图采用 OriginPro 2020 (OriginLab, USA),研究区示意图制图采用 ArcGIS 10.6(ESRI, USA)。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分的时空变化特征

如图 3 所示,2014—2018 年生长季期间,不同恢复年限刺槐林 0—180 cm 土壤深度的平均土壤储水量(SWS)显著差异(P<0.05),15 a 刺槐林和 35 a 刺槐林的平均 SWS 分别为 128.8 mm 与 150.8 mm,显著低于 20 a 和 30 a 刺槐林的平均 SWS(分别达到 184.6 mm 与 184.9 mm),研究结果显示,随着恢复年限的增加,刺槐 林的 SWS 呈现先增加后降低的态势,同时,不同恢复年限人工刺槐林的 SWS 随时间的变异程度(CV)也不尽 相同,从图 3 的箱式图可看出 15 a 和 35 a 恢复年限刺槐林 SWS 的 CV 值高于 20 a 和 30 a 恢复年限刺槐林。 虽然刺槐在于黄土高原栽植时间超过 40 a,但由于受到长期水分胁迫,随着生长年限增加,出现多树梢、衰亡 等"小老头树"现象^[33],很难找到成片超过 40 a 刺槐林,因此本研究比较的恢复年限仅限于小于 40a,难以对 小于 40a 恢复年限刺槐林土壤水分动态特征进行描述。自 2014—2018 年,SWS 的年际变化趋势与年降水一 致,但 2014 年的 SWS 比 2017 年更高,是由于 2013 年小流域的降水超过 900 mm 所致。当雨水充沛时,刺槐 根系较少利用深层土壤水分^[34],因此深层土壤水分能够保持较高水平,如 2015 年的 SWS 与 2016 年的相当, 主要由于 2014 年的较高储水量使得 2015 年降水量较低而 SWS 能够保持更高水平。



Fig.3 Survey of mean soil water storage at black locust plantation with different restored years in growth season from 2014—2018 字母代表组间差异,(P<0.005)

图 3 2014—2018 年生长季不同恢复年限人工刺槐林土壤储水量变化

如图 4 所示, 2014—2018 年生长季(5—10 月) 羊圈沟小流域年降雨水差异明显, 分别是 571.2、264.8、447.4、668.4、423.4 mm。自 2014—2018 年期间 15 a 和 35 a 恢复年限刺槐林的平均 SVWC 分别仅有 0.067 和 0.071 m³/m³, 显著低于 20 a 和 30 a 恢复年限刺槐林的 0.103 m³/m³和 0.108 m³/m³(图 4 中显示橙红色)。图 4 也能看出, 2014 年不同恢复年限的刺槐林平均 SVWC 也是 15 a(0.122 m³/m³)和 35 a(0.110 m³/m³)的大于 20 a(0.144 m³/m³)与 30 a(0.132 m³/m³)的。2017 年生长季降水大于 2014 年生长季降水, 但 2014 年的 2017 年四个刺槐林的 SVWC 显著低于 2014 年的 SVWC(P<0.05), 土壤水分与降水没有出现良好的相关关系, 这 是由于 2013 年的降雨量高达 959.3 mm(图 2), 其深层土壤水分得到了充分的补给而受到当年降水的影响较 小。同时,结果显示 15 a 和 35 a 恢复年限刺槐林在 2015 年至 2018 年生长季期间, 有相当一段时间土壤水分 处于 WP 的水平(0.03—0.06 m³/m³)。2016 年与 2017 年降水量较高, 尤其是 2017 年, 全年降水达到 746.2 mm, 属丰水年, 很大程度缓解了水分对刺槐林的胁迫, 是降水对土壤水分起到补给的作用^[25, 35-36]。

2.2 土壤水分变异程度分布特征

不同恢复年限刺槐林的 SVWC 随着土壤深度增加,其时间上的 CV 值也随之变化,表现出与 SVWC 同样的变化特征,15 a 和 35 a 恢复年限的 CV 值随土壤深度变化较小,20 a 与 30 a 恢复年限刺槐林 SVWC 的 CV 值都随着土壤深度的增加而减小。从不同土壤深度 SVWC 月均 CV 值可看出(图 5):4 个样地 0—180 cm 土壤深度的土壤水分 CV 值都<100%,都属于中等变异性以下(10% < CV < 100%),其中图 5 的绿色部分代表弱变异性(CV < 10%),同时也能看出 15 a、20 a 以及 30 a 恢复年限刺槐林的土壤水分变异性具有较为一致的时空格局,土壤深度 100 cm 以下总体为弱变异性,而 35 a 恢复年限刺槐林土壤水分在 2014—2015 年期间主要为中等变异性,2016—2018 年转为弱变异性为主的时空动态格局,35 a 恢复年限刺槐林林下植被为土庄绣线菊群落(图 1,表 1),并且该林分林下植被覆盖度大于其他林分的林下植被,对土壤水分的消耗量更大。降水集中的 7—9 月期间为生长季旺盛期,各刺槐林土壤水分变异程度比其他月份更强,由于土壤水分主要受降水以及植被生长等的影响。土壤水分空间变异性的时空分布特征进一步表明土壤水分的稳定性随土壤深度增加而增加。



图 4 2014—1018 年生长季降水特征、不同恢复年限人工刺槐林生长季的日平均土壤水分时空动态变化

Fig.4 Spatiotemporal dynamics of precipitation and daily soil moisture at black locust plantation with different restoration years in growth season of 2014 to 2018

P 为各年降水量

2.3 时间稳定性分析及代表深度

根据 Brocca 等^[37]的研究,本研究采用相对差分与 Spearman 秩相关系数两种方法对土壤水分的时间稳定 性进行分析。通过不同土壤深度平均相对差分(MRD)以及观测不同土壤深度的土壤水分时间稳定性指数 (ITSD_i),确定 ITSD_i最低值及其所代表的土壤深度(图6)。不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时间稳定性特 征不同,MRD 的变化范围分别为-24%—29%,-32%—25%,-46%—33%和-53%—25%,15 a 和 20 a 恢复年 限刺槐林土壤水分的 MRD 变化较 30 a 和 35 a 恢复年限的小,表明其时间稳定性更高,代表深度分别为 80、 100、80、150 cm 土层。35 a 恢复年限刺槐林的代表深度较其他恢复年限的更深,可达 150 cm,这主要由于不 同恢复年限刺槐林的根系分布特征所决定^[38],植物往往通过调节根系分布来响应降水的分配^[39],刺槐根系 生物量垂直分布随着林龄增加而更深^[40],但在长期干旱的情况下,深层根系和土壤提供更多水分的能力将受 到限制^[41],进一步解释 35 a 恢复年限的刺槐林土壤水分更加稳定代表深度更深。



图 5 不同恢复年限刺槐林土壤水分月变异程度(CV-10%)

Fig.5 Monthly variability (CV-10%) of soil water at black locust plantations with 15 a, 20 a, 30 a and 35 a restoration years. Black line with 0.00 value label refers to light variability



Fig.6 Temporal stability of soil moisture at black locust plantations with different restoration years 平均相对差分(MRD,黑色实线)、代表深度(红点)以及相对差分标准偏差(SDRD,误差棒)和时间稳定性指数(ITSD,蓝色虚线)

表 2 分析了不同恢复年限刺槐林 0—180 cm 不同土壤深度 SVWC 的 Spearman 秩相关系数。表中可看出 不同恢复年限刺槐林土壤水分的 Spearman 秩相关系数在不同土壤深度上总体差异不大,15 a 和 20 a 恢复年 限刺槐林在上层(0—80 cm)之间 SVWC 总体呈现极显著相关性(*r*_s约 0.546—0.956 和 0.455—0.954),下层 (100—180 cm)之间也呈现出极显著相关性(*r*_s约 0.447—0.971 和 0.578—0.929),而上下层之间总体呈现弱 相关性(*R*²约 0.023—0.357 和 0.165—0.326);30 a 和 35 a 恢复年限刺槐林呈现极显著相关性的土壤深度为 0—60 cm(*r*_s约 0.023—0.357 和 0.165—0.326);而下层(80—180 cm)之间呈现极显著相关性(0.370—0.937 和 0.380—0.952),而上下土层之间呈现弱相关性(*r*_s约 0.023 — 0.357 和 0.165 — 0.326)。结果进一步表明上下 土层之间的土壤水分时间稳定性不同,同时还说明上下土层土壤水分之间受到的影响因素不一致,这与前人 的研究结果—致^[42]。

样地 Plot name	深度/cm Depth	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	150 cm	180 cm
15 a	10	1	0.956 **	0.802 **	0.573 **	0.301	0.168	0.113	0.219	0.067
	20		1	0.956 **	0.821 **	0.739 **	0.459 *	0.357	0.267	0.156
	40			1	0.915 **	0.848 **	0.604 **	0.515 **	0.428 *	0.312
	60				1	0.950 **	0.762 **	0.689 **	0.591 **	0.447 *
	80					1	0.853 **	0.794 **	0.694 **	0.557 **
	100						1	0.971 **	0.878 **	0.735 **
	120							1	0.954 **	0.849 **
	150								1	0.924 **
	180									1
20 a	10	1	0.933 **	0.718 **	0.608 **	0.455 *	0.273	0.165	0.210	0.256
	20		1	0.852 **	0.745 **	0.600 **	0.368 *	0.317	0.326	0.379 *
	40			1	0.954 **	0.869 **	0.628 **	0.630 **	0.592 **	0.578 **
	60				1	0.954 **	0.734 **	0.715 **	0.646 **	0.605 **
	80					1	0.870 **	0.844 **	0.772 **	0.721 **
	100						1	0.884 **	0.810 **	0.789 **
	120							1	0.897 **	0.798 **
	150								1	0.929 **
	180									1
30 a	10	1	0.937 **	0.782 **	0.585 **	-0.064	0.301	-0.097	-0.092	0.074
	20		1	0.916 **	0.754 **	0.072	0.495 **	0.119	0.118	0.280
	40			1	0.840^{**}	0.230	0.510 **	0.254	0.262	0.386 *
	60				1	0.370*	0.673 **	0.523 **	0.463 *	0.539 **
	80					1	0.180	0.427 *	0.432*	0.316
	100						1	0.545 **	0.299	0.304
	120							1	0.792 **	0.705 **
	150								1	0.937 **
	180									1
35 a	10	1	0.956 **	0.802 **	0.573 **	0.301	0.168	0.113	0.219	0.067
	20		1	0.898 **	0.697 **	0.439 *	0.306	0.248	0.293	0.153
	40			1	0.886 **	0.682 **	0.505 **	0.414 *	0.380 *	0.294
	60				1	0.823 **	0.601 **	0.513 **	0.567 **	0.406 *
	80					1	0.871 **	0.770 **	0.535 **	0.624 **
	100						1	0.952 **	0.476 **	0.835 **
	120							1	0.547 **	0.915 **
	150								1	0.627 **
	180									1

表 2 不同土壤深度 Spearman 秩相关系数矩阵 Table 2 Spearman correlation coefficient matrix of different soil depth at 0—180 cm soil profile

* *. P < 0.01,极显著相关; *. P < 0.05,显著相关

2.4 土壤水分代表深度结果评价

通过土壤水分时间稳定性分析确定不同恢复年限刺槐林代表土壤深度,采用决定系数 R²与纳什系数 NSE 对该结果进行评估(图7)。图7描述了代表性土壤深度 SVWC 和该林分平均 SVWC 的线性关系,15 a 恢 复年限刺槐林的 R²最高,达到 0.91,线性显著相关,而其余三个不同恢复年限刺槐林的 R²低于 0.6,为 0.49—0.59。将代表性土壤深度 SVWC 与林分平均 SVWC 月均值进行计算纳什系数(图7),结果表明,不同恢复年限刺槐林的 NSE 的范围为 0.32—0.82,其中 15 a 恢复年限刺槐林的代表性最强,达到了 0.82,而其余三个林分的代表性结果接近总体平均值水平,总体结果可信,但仍具有一定误差。不同恢复年限刺槐林的代表性结果可接受。已有研究证明土壤水分时间稳定性受到如地形地貌^[19,42-43],土壤质地^[44],气候条件^[45]以及植被生长状况^[22,46]等多重因素的共同影响。植被演替可显著地改变包括土壤微生物、养分等土壤性质^[47],进而影响植被与土壤水分的关系。





2.5 时间稳定性的主要影响因素

根据上述研究结果表明,土壤水分空间格局的时间稳定性随恢复年限的变化而变化。然而,尚不清楚哪些具体因素能够准确解释这4个不同恢复年限刺槐林的土壤水分在时间稳定性上的差异。表1所展示的植被与土壤特征无法直接得出明确的结果,对此,灰色关联分析(GRA)被用作确定主要影响因素。如表3所示,以林下植被盖度、土壤容重等16个植被与土壤因子作为灰色关联分析的环境因子。分别以SDRD作为参考序列,结果表明以砂粒、土壤总氮、容重、有机碳等土壤因子的关联度比植被因子更高。Jia等^[30]在研究不同植被类型对土壤储水量时间稳定性的影响时,以SDRD作为参考序列,对环境因子进行关联度分析发现植被覆盖度以及地上生物量的关联度最高,高于0.7,为主要影响因素;而本研究以SDRD作为参考序列关联度排前列的是土壤因子,最高的为砂粒,高达0.817,并且土壤总氮、土壤容重、土壤有机碳、土壤总孔隙度以及坡度是主要影响因素(高于0.7);其次影响因素分别是粉粒、黏粒、林下植被覆盖度、田间持水量以及林龄和平均胸径(介于0.6—0.7之间)。考虑到环境因子之间具有相互作用,关联度分析结果表明,土壤因子总体比植

被因子对土壤水分时间稳定性的影响更重要,但植被因素对其影响也不容小视。总所周知,在干旱半干旱区 域土壤水分的动态主要受到降水入渗、植被根系吸收以及土壤蒸发^[31,48-49],而降水入渗由降水特征以及土壤 特性决定,植被根系决定对土壤水分的吸收,土壤蒸发受制于植被覆盖,1m 左右土壤深度受蒸发影响较表层 弱,而又能受到较深层土层更多的降水入渗补给^[50],该深度也是植被根系吸收水分较为活跃的土层,降水入 渗补给也能够一定程度抵消植被根系的吸收^[34],因此该深度土壤水分具有明显的时间稳定性。

	Table 3 Grey relational	grade of all investigated f	actors in the a	nalysis of soil water temporal s	tability
排序 Rank	环境因子 Factors	关联度 $\xi_i(k)$	排序 Rank	环境因子 Factors	关联度 $\xi_i(k)$
1	砂粒	0.817	9	黏粒	0.653
2	土壤总氮	0.784	10	林下植被盖度	0.652
3	土壤容重	0.744	11	田间持水量	0.634
4	土壤有机碳	0.742	12	林龄	0.625
5	土壤总孔隙度	0.736	13	平均胸径	0.614
6	坡度	0.712	14	林分密度	0.576
7	平均树高	0.711	15	饱和导水率	0.549
8	粉粒	0.674	16	平均土壤储水量	

表 3 土壤水分时间稳定性分析中各研究因素的灰色关联度

3 结论

人工刺槐林经过多年的自然恢复,其土壤水分时空特征发生显著的变化。本研究以空间代时间的方法, 于 2014—2018 年对黄土高原丘陵沟壑区典型小流域不同恢复年限刺槐林的土壤水分进行长时间序列观测, 分析 15、20、30、35 a 恢复年限刺槐林土壤水分时空动态,同时采用相对差分与 Spearman 秩相关系数两种方法 来分析不同恢复年限刺槐林土壤水分时间稳定性,确定不同恢复年限刺槐林土壤水分的代表深度,并采用决 定系数 *R*²与纳什系数 NSE 对土壤深度的代表性进行评价,得出以下结论:

(1)不同恢复年限刺槐林土壤水分差异显著,其储水量大小排序依次为 30 a>20 a>35 a>15 a;随着恢复 年限增加,刺槐林土壤储水量呈现先增加后降低的趋势;不同恢复年限刺槐林土壤水分时空分布特征差异明 显,土壤水分变异性随土壤深度增加而减小,但不随恢复年限而有规律的变化;土壤水分变化主要受降水及植 被生长需求的影响,其变异性的时空格局进一步表明土壤水分的稳定性随土壤深度增加而增加;

(2)通过相对差分分析不同恢复年限刺槐林土壤水分时间稳定性,采用时间稳定性指数确定 15、20、30、 35 a 的代表深度分别为 80、100、80、150 cm 土层; Spearman 秩相关分析表明,上土层与下土层的土壤水分的时 间稳定性特征差异明显;

(3)线性回归与纳什系数结果显示,决定系数 R²的范围为 0.49—0.91,纳什系数 NSE 的范围为 0.32—0.82,其中 15 a 恢复年限刺槐林的代表深度具有最好的代表性,决定系数和纳什系数分别达到 0.91 和 0.82。 线性回归与纳什系数结果表明通过相对差分与时间稳定性指数得到土壤水分代表深度的结果是可接受的,但仍存在一定误差,在模型模拟时需考虑这部分的不确定性。

(4) 灰色关联度分析表明, 土壤质地(砂粒), 土壤总氮、土壤容重、土壤有机碳、土壤总孔隙度以及坡度是 不同恢复年限刺槐林土壤水分时间稳定性主要影响因素。

参考文献(References):

 D.R. Legates, R. Mahmood, D.F. Levia, T.L. DeLiberty, S.M. Quiring, C. Houser, F.E. Nelson. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(1):65-86.

[2] 陈洪松,王克林,邵明安.黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展.林业科学,2005,41(4):155-161.

- [3] Chen H S, Shao M G, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. Geoderma, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [4] Wang X C, Li J, Tahir M N, Fang X Y. Validation of the EPIC model and its utilization to research the sustainable recovery of soil desiccation after alfalfa (*Medicago sativa* L.) by grain crop rotation system in the semi-humid region of the Loess Plateau. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 161: 152-160.
- [5] Wang Y Q, Hu W, Zhu Y J, Shao M A, Xiao S, Zhang C C. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. Journal of Hydrology, 2015, 527: 543-554.
- [6] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China. Geoderma, 2010, 159(1/2): 99-108.
- [7] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [8] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [9] 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.地理学报,2000,67(1):84-91.
- [10] 王盛萍, 张志强, 武军, Edward K, 战伟庆, 肖金强. 坡面林地土壤水分特征函数空间变异性初探. 环境科学研究, 2007, 20(2):28-35.
- [11] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子.生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [12] Jiao L, An W M, Li Z S, Gao G Y, Wang C. Regional variation in soil water and vegetation characteristics in the Chinese Loess Plateau. Ecological Indicators, 2020, 115: 106399.
- [13] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, Vauclin M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.
- [14] 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.农业工程学报,2011,27(7):45-50.
- [15] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性. 应用生态学报, 2017, 28(2):430-438.
- [16] Gómez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J, Castillo V. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semiarid environment. Hydrological Processes, 2000, 14(7): 1261-1277.
- [17] 冉有华,李新,王维真,晋锐.黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析.地球科学进展,2009,24(7):817-824.
- [18] Hu W, Shao M A, Han F P, Reichardt K, Tan J. Watershed scale temporal stability of soil water content. Geoderma, 2010, 158(3/4): 181-198.
- [19] Jia Y H, Shao M A, Jia X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China. Journal of Hydrology, 2013, 495: 150-161.
- [20] Li D F, Shao M A. Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops. Agricultural Water Management, 2014, 144: 140-149.
- [21] Liu Bingxia X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2014, 517: 974-984.
- [22] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, Lü N, Lü Y H, Wang S. Temporal stability of surface soil moisture of different vegetation types in the Loess Plateau of China. CATENA, 2015, 128: 1-15.
- [23] Zhu X C, Shao M A, Liang Y. Spatiotemporal characteristics and temporal stability of soil water in an alpine meadow on the northern Tibetan Plateau. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98(1): 161-174.
- [24] Zhao Z M, Shen Y X, Wang Q H, Jiang R H. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky environments. CATENA, 2020, 187: 104418.
- [25] Chen W L, Li Z S, Jiao L, Wang C, Gao G Y, Fu B J. Response of soil moisture to rainfall event in black locust plantations at different stages of restoration in hilly-gully area of the Loess Plateau, China. Chinese Geographical Science, 2020, 30(3):427-445.
- [26] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, Lin H, Horn R. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. Hydrological Processes, 2010, 24(18): 2507-2519.
- [27] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability. Wageningen: Pudoc, 1985: 2-30.
- [28] Deng J L. Introduction to Grey system theory. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24.
- [29] 叶小岭,姚珍珍. 基于灰关联谱聚类模型的福建省暴雨灾害评价研究. 安徽农业科学, 2012, 40(15): 8639-8641.
- [30] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China. Agricultural Water Management, 2013, 117: 33-42.
- [31] Zhang P, Xiao P Q, Yao W Y, Liu G B, Sun W Y. Profile distribution of soil moisture response to precipitation on the Pisha sandstone hillslopes of China. Scientific Reports, 2020, 10(1): 9136.
- [32] 张北赢,徐学选,刘文兆,杜峰.黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度.生态学报,2008,28(1):361-366.

- [33] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,张孝中.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 I小老树的分布及其生长特点.水土保持学报,1991, (01):64-72.
- [34] Wang J, Fu B J, Wang L X, Lv N, Li J Y. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 288-289:108020.
- [35] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Yao X L, Zhou J. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2883-2892.
- [36] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. CATENA, 2013, 101: 122-128.
- [37] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. Geoderma, 2009, 148 (3/4): 364-374.
- [38] 苏瑾,王迪海.黄土区不同林龄刺槐人工林细根的衰老生理特征.生态学报,2016,36(14):4423-4429.
- [39] Zhang B W, Cadotte M W, Chen S P, Tan X R, You C H, Ren T T, Chen M L, Wang S S, Li W J, Chu C J, Jiang L, Bai Y F, Huang J H, Han X G. Plants alter their vertical root distribution rather than biomass allocation in response to changing precipitation. Ecology, 2019, 100 (11): e02828.
- [40] Chen L L, Mu X M, Yuan Z Y, Deng Q, Chen Y L, Yuan L Y, Ryan L T, Kallenbach R L. Soil nutrients and water affect the age-related fine root biomass but not production in two plantation forests on the Loess Plateau, China. Journal of Arid Environments, 2016, 135: 173-180.
- [41] Markewitz D, Devine S, Davidson E A, Brando P, Nepstad D C. Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake. New Phytologist, 2010, 187(3): 592-607.
- [42] Percy M S, Riveros-Iregui D A, Mirus B B, Benninger L K. Temporal and spatial variability of shallow soil moisture across four planar hillslopes on a tropical ocean island, San Cristóbal, Galápagos. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 30: 100692.
- [43] Biswas A, Si B C. Scales and locations of time stability of soil water storage in a hummocky landscape. Journal of Hydrology, 2011, 408(1/2): 100-112.
- [44] Gao L, Shao M A. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. CATENA, 2012, 95: 24-32.
- [45] Penna D, Brocca L, Borga M, Fontana D G. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. Journal of Hydrology, 2013, 477: 55-71.
- [46] Zhang Y W, Deng L, Yan W M, Shangguan Z P. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China. CATENA, 2016, 137; 52-60.
- [47] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. Forest Ecology and Management, 2005, 217(1): 117-125.
- [48] Brandt A C, Zhang Q Q, Caceres M L L, Murayama H. Soil temperature and soil moisture dynamics in winter and spring under heavy snowfall conditions in North-Eastern Japan. Hydrological Processes, 2020;3235-3251.
- [49] Tian J, Zhang B Q, He C S, Han Z B, Bogena H R, Huisman J A. Dynamic response patterns of profile soil moisture wetting events under different land covers in the Mountainous area of the Heihe River Watershed, Northwest China. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 271:225-239.
- [50] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, Shao M A, An Z S. Variations in capacity and storage of plant-available water in deep profiles along a revegetation and precipitation gradient. Journal of Hydrology, 2019, 581:124401.