

# 乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应

李新乐<sup>1,2,3</sup>, 刘雅婧<sup>1,2,3</sup>, 孙非<sup>1</sup>, 王丹阳<sup>1,2,3</sup>, 安景源<sup>1,2,3</sup>, 牧仁<sup>1,2,3</sup>, 张景波<sup>1</sup>

(1.中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 2.内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 磴口 015200; 3.国家林业和草原局 植物新品种测定中心 磴口分中心, 内蒙古 磴口 015200)

**摘要:** [目的] 探讨乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应, 为准确评估丘间地在白刺灌丛沙堆土壤水分循环和保持土壤水分稳定性的作用提供科学依据和数据支撑。[方法] 采用 EM50 土壤水分自动测量系统对丘间地黏土层土壤水分进行长期原位监测, 分析不同降雨条件下丘间地土壤水分空间格局和时间动态, 定量描述降雨量、雨前土壤水分含量与丘间地黏土层土壤水分入渗和保持时间的关系。[结果] ①从丘间地黏土层土壤水分空间变异特征来看, 0—25 cm 土层土壤水分的变异程度均为中度变异, 其中表层(0—15 cm)变异性较大, 下层(15 cm 以下)变异性较小。②降雨量的大小决定了降雨后丘间地土壤水分入渗深度和保持时间, 降雨量平均每增加 1 mm, 丘间地黏土层土壤水分下渗深度增加 0.57 cm, 土壤水分保持时间增加 1.05 d。雨前土壤水分含量过高抑制丘间地黏土层土壤水分的继续下渗, 但对降雨后丘间地黏土层土壤水分保持时间有显著的正效应, 表现为雨前土壤水分含量每增加 1%, 单位降雨量的下渗深度下降 0.02 cm, 而丘间地黏土层土壤水分保持时间增加 9.85 d。③大雨事件(>20 mm)对丘间地黏土层土壤水分具有明显的补给作用, 降雨后土壤水分降低较为缓慢。[结论] 丘间地黏土层能够抑制土壤水分蒸发, 具有较好的蓄水保水效应。

**关键词:** 乌兰布和沙漠; 丘间地黏土层; 土壤水分; 空间格局; 时间动态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0039-08

中图分类号: Q149

**文献参数:** 李新乐, 刘雅婧, 孙非, 等. 乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 39-46. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.005; Li Xinle, Liu Yajing, Sun Fei, et al. Spatial-temporal patterns of soil water in the clay layer at inter-dune area of *Nitraria tangutorum* and its response to rainfall changes in Ulan Buh desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 39-46.

## Spatial-temporal Patterns of Soil Water in Clay Layer at Inter-dune Area of *Nitraria Tangutorum* and Its Response to Rainfall Changes in Ulan Buh Desert

Li Xinle<sup>1,2,3</sup>, Liu Yajing<sup>1,2,3</sup>, Sun Fei<sup>1</sup>, Wang Danyang<sup>1,2,3</sup>, An Jingyuan<sup>1,2,3</sup>, Mu Ren<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jingbo<sup>1</sup>

(1. *Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia*

015200, China; 2. *Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, National*

*Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 3. *Dengkou Station of New Plants**

*Varieties Testing Center, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)*

**Abstract:** [Objective] The spatial-temporal patterns of soil water at the inter-dune area of *Nitraria tangutorum* nebkhas and its response to rainfall changes were determined in order to provide a scientific basis and data support for the accurate assessment of the role of inter-dunes in the soil water cycle and soil water stability in *Nitraria tangutorum* nebkhas. [Methods] The EM50 automated soil moisture measurement

收稿日期: 2022-06-02

修回日期: 2022-07-04

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项“增雨驱动油蒿入侵白刺沙包的机理研究”(CAFYBB2020MB007); 内蒙古自治区科技计划项目“内蒙古优质抗逆植物资源开发及利用研究”(2020GG0127); 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0177)

第一作者: 李新乐(1989—), 男(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 博士研究生, 研究方向为荒漠生态学。Email: nxyxl@126.com。

通讯作者: 张景波(1982—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 博士, 高级工程师, 主要从事荒漠植物生理生态、荒漠生态学研究。Email: 83850341@qq.com。

system was used to acquire long-term in-situ measurements of soil moisture in the clay layer of the inter-dune area. We analyzed the spatial patterns and temporal dynamics of soil water in the inter-dune soils under different rainfall conditions, quantifying the relationship between rainfall, soil water content before rainfall, and soil water infiltration and retention time in the inter-dune clay layer. [Results] ① From the perspective of the spatial variation characteristics of soil water in the clay layer, the variation degree of soil water in the 0—25 cm soil layer was characterized as moderate variation, among which the surface layer (0—15 cm) had greater variability and the lower layer (below 15 cm) had less variability. ② The magnitude of rainfall determined the infiltration depth and retention time of soil water at the inter-dune area after rainfall. As the average rainfall increased by 1 mm, the infiltration depth of soil water in the clay layer increased by 0.57 cm, and the soil water retention time increased by 1.05 days. Excessive soil water content before a rainfall event inhibited the continuous infiltration of soil water in the clay layer, but had a significant positive effect on soil water retention time after the rainfall, as shown by a 1% increase in soil water content before a rainfall event, and a 0.02 cm decrease in infiltration depth per unit rainfall, while the soil water retention time of the clay layer increased by 9.85 days. ③ Heavy rainfall events (>20 mm) had an obvious replenishment effect on soil water in the clay layer, and the soil water decreased slowly after rainfall. [Conclusion] The inter-dune clay layer can inhibit soil water evaporation and provide good water storage and water retention.

**Keywords:** Ulan Buh desert; clay layer between inter-dunes; soil water content; spatial pattern; time dynamics

土壤水分是综合气候、土壤以及植被对水分平衡响应和水分平衡对植被动态影响的关键变量<sup>[1-3]</sup>,因此土壤水分动态监测始终是生态系统定位观测的重要内容。对于干旱荒漠区而言,降水是该区域土壤水分补给的主要甚至唯一来源,土壤水分状况与降水量大小、降水格局关系密切<sup>[4]</sup>。因此,研究干旱区土壤水分时空格局及其对降水格局变化的响应可以更好地揭示荒漠生态系统稳定的生态水文学机理<sup>[5-6]</sup>,这也是干旱区植被恢复与重建过程中亟须解决的关键问题<sup>[7]</sup>。与其他地区相比,降水在干旱地区具有极大的不确定性,主要表现为降水呈脉动特征<sup>[8]</sup>,较大降水会导致明显的土壤水分脉动现象,而较小的降水只能导致浅层土壤的水分入渗<sup>[9]</sup>。由此可见,不同的降水事件对土壤中水分的影响不同,有学者研究表明,当降水量大于 10 mm 时,能够有效地补给土壤水分,促进沙地近地表水分循环<sup>[10]</sup>。而当降水量小于 5 mm 时,少量的降水对土壤水分几乎起不到补充的作用<sup>[11]</sup>。

丘间地是指沙丘(或者沙堆)之间的低洼地,是干旱区土壤水分循环的重要组成部分<sup>[12]</sup>。目前,以丘间地作为研究对象来开展土壤水分研究的报道极少,董义阳等<sup>[13]</sup>以古尔班通古特沙漠南缘丘间地为研究对象,应用压力膜仪测定了丘间地剖面各土层(0—150 cm)的土壤水分特征曲线,并用最优拟合模型对其进行了模拟。周学雅等<sup>[14]</sup>研究表明,科尔沁沙地丘间地雨前土壤水分随深度增加,直至饱和含水量,其变化范围在 3.88%~21.57%。雨后 0—90 cm 深度土壤水分增加,其中 0—10 cm 深度水分增量较

大,其范围是 6.29%~20.3%,其余深度水分增量较小。阿拉木萨等<sup>[15]</sup>研究发现丘间低地浅层土壤中黏土和有机质含量较高且根系较多使得 0—20 cm 土壤持水能力较强,减小了间歇性降雨导致的蒸发。干旱区贡献率较大的大降雨事件和占有较大比重的小降雨事件均会在土壤水分循环中产生重要作用,并存在明显的差异性,然而,关于不同降雨量对丘间地土壤水分补给差异缺乏对比研究。此外,对丘间地土壤水分的研究手段还比较单一,主要是在降雨后定期进行取样,数据量较少,且缺乏连续性,无法反映土壤水分时空动态变化的全过程。

乌兰布和沙漠位于中国北方敏感的生态过渡带,境内分布大面积的荒漠植被,其中以唐古特白刺为建群种的白刺荒漠是分布较广的天然荒漠植被类型<sup>[16]</sup>。丘间地是乌兰布和沙漠白刺荒漠景观中非常重要的组成部分,镶嵌在白刺灌丛沙堆周围,在降雨再分配及灌丛沙堆土壤水分循环过程中发挥着重要作用,由于受到干旱区试验条件恶劣以及研究手段的限制,目前对丘间地的研究一直未引起重视,限制了我们对其生态水文效应的认识<sup>[17]</sup>。干旱区降雨稀少,1 a 内无法采集到不同量级的降雨事件,本研究通过对白刺灌丛沙堆周围的丘间地土壤水分进行连续 2 a 监测,系统分析不同降雨条件下丘间地黏土层的土壤水分空间格局及时间动态,量化降雨量、雨前土壤水分含量与丘间地黏土层土壤水分入渗和保持时间的关系,为准确评估丘间地在白刺灌丛沙堆土壤水分循环和保持土壤水分稳定性的作用提供科学依据和数据支撑。

## 1 研究区概况

研究样地选择白刺灌丛沙堆长期固定监测大样地, 该样地建于2013年, 位于国家林草局内蒙古磴口生态站西侧, 地理坐标为 $106^{\circ}45'27''\text{E}$ ,  $40^{\circ}25'53''\text{N}$ , 样地大小为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ( $100\text{ hm}^2$ ), 样地四周使用铁丝围栏进行封闭式管理, 防止人为和牲畜干扰和破坏。区域属于温带大陆性干旱气候, 年平均气温 $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 多年平均降雨量约 $145\text{ mm}$ , 降雨主要集中在6—9月, 约占全年降雨的 $70\%\sim 80\%$ , 年蒸发量约 $2\,327\text{ mm}$ , 无霜期 $136\text{ d}$ 。植被类型属于温带灌木荒漠, 唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)是大样地内的优势植物, 主要以白刺灌丛沙堆的形式存在<sup>[7]</sup>, 伴生种有油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、烛台虫实(*Corispermum candela-brum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)和猪毛菜(*Salsola collin*)等。大样地内大部分灌丛沙堆完全独立分布, 个别沙堆之间存在互相重叠的现象, 沙

堆之间主要由丘间地黏土层包围, 丘间地地势较为平坦。根据附近地下水位长期监测数据, 地下水位常年在 $5\text{ m}$ 以下, 无法补给该区域丘间地黏土层土壤水分, 因此土壤水分变化只受自然降水的影响。

## 2 测定内容与方法

### 2.1 测定内容

在样地内选择4个生长良好、完全独立和大小一致的白刺灌丛沙堆(表1), 沙堆周围被丘间地黏土层包围。安装4套EM50土壤水分自动监测系统, 土壤水分传感器安装在丘间地黏土层正下方, 在垂直方向上的安放深度分别为 $5, 10, 15, 20$ 和 $25\text{ cm}$ 共5层, 不同层次土壤水分传感器上下垂直排布, 以观察降雨发生后丘间地黏土层土壤水分变化特征、垂直入渗过程和入渗深度(图1), 土壤水分数据在生长季(5—10月)的读取时间间隔设置为 $5\text{ min}$ , 在非生长季(11月至翌年4月)设置为 $3\text{ h}$ , 仪器于2019年8月安装, 为减少按照仪器时土壤破坏和扰动对测量数据准确度的影响, 分析使用2020—2021年的土壤水分数据。



图1 丘间地黏土层景观及土壤水分传感器安装

表 1 白刺灌丛沙堆基本信息

编号	长轴长/ cm	短轴长/ cm	沙堆 高度/cm	盖度/ %	枝条 高度/cm	枝条 冠幅/cm
1	649	521	114	41	49±3.7	72±16.6
2	635	554	102	47	56±6.1	53±20.9
3	691	574	143	54	46±4.8	69±31.5
4	667	581	134	44	51±5.3	42±15.7

## 2.2 数据分析

利用 Excel 2019 将 2020—2021 年采集的丘间地黏土层土壤水分数据整理为小时数据、日值数据、月值数据和年际数据,计算不同土层深度下丘间地黏土层平均土壤水分含量均值、标准差和变异系数,分析自然降雨环境下丘间地黏土层土壤水分垂直分布空间格局和时间动态。同时,结合 2020—2021 年典型自然降雨事件,分析不同降雨量下丘间地黏土层土壤水分垂直入渗规律。通过 OriginPro 2021 对相关数据进行处理分析及制图。

## 3 结果与分析

### 3.1 丘间地黏土层土壤水分空间变异特征

从表 2 中可以看出,随土层深度的增加,丘间地黏土层年平均土壤水分含量逐渐增大,而年平均土壤

水分含量标准差和变异系数则呈现逐渐降低的趋势。通过比较不同土层深度土壤水分含量的标准差发现,0—15 cm 土层标准差较大。2020 和 2021 年丘间地黏土层 0—25 m 土层土壤水分的变异系数均在 10%~100%之间,根据变异系数划分等级,土壤水分变异程度为中度变异。

表 2 丘间地黏土层土壤水分垂直分布变异特征

年份	土层深度/cm	均值/%	标准差	变异系数/%
2020	5	7.50	4.42	58.93
	10	8.38	4.15	49.52
	15	10.98	3.71	33.79
	20	12.63	3.13	24.78
	25	13.08	2.28	17.43
2021	5	8.96	3.93	43.86
	10	10.54	3.51	33.32
	15	13.70	3.07	22.41
	20	15.04	2.73	18.16
	25	16.77	2.63	15.68

### 3.2 丘间地黏土层土壤水分动态

从图 2 可以看出,丘间地黏土层不同土层深度的土壤含水量变化趋势较为一致,但在不同降雨年型存在明显差异。

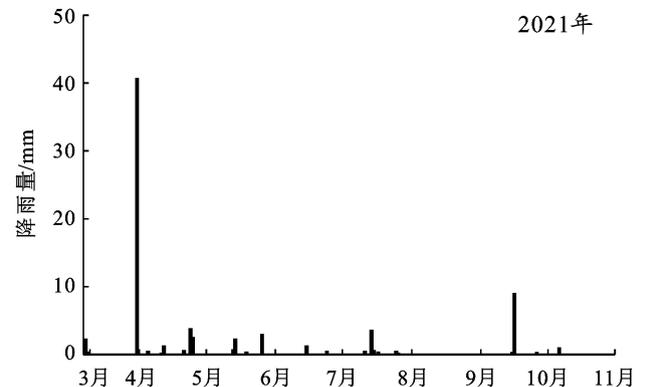
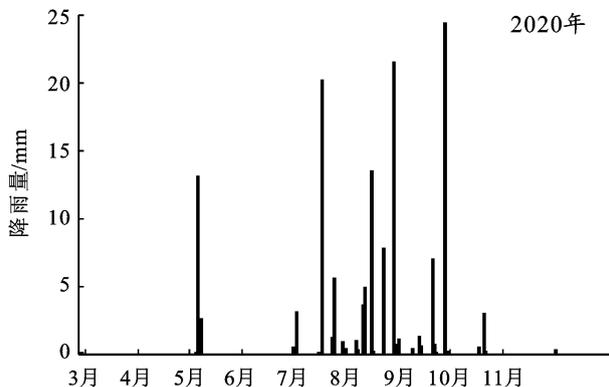
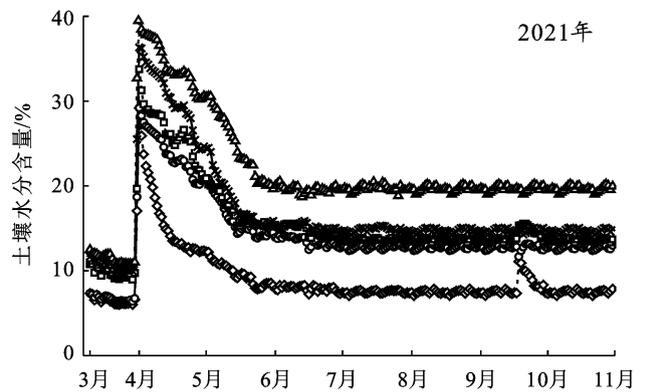
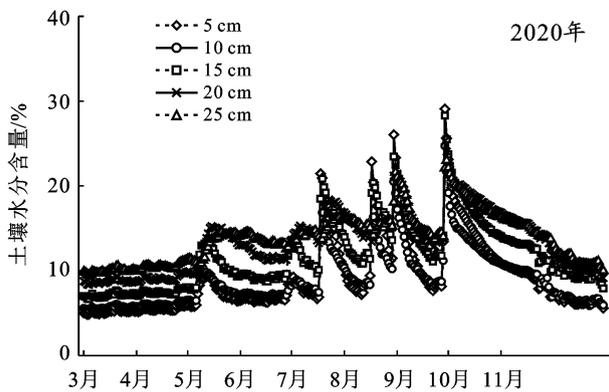


图 2 不同降雨年型下丘间地黏土层土壤水分动态

对于2020年(丰水年)而言,丘间地黏土层土壤水分在5—10月波动较为明显,特别是0—15 cm深度土层土壤水分受到间断性降雨的影响变化较大。对于2021年(枯水年)而言,丘间地黏土层土壤水分波动较小,仅在3月底受到大雨事件(降雨量为40.6 mm)的影响有一次明显的增加过程,而后土壤水分缓慢下降,在6月初恢复到降雨前的水平,之后土壤水分变化较小,在9月22日遇到小雨事件后15 cm土层深度内土壤水分略微增加后恢复到降雨前的水平。对于丘间地黏土层不同深度土层而言,15 cm以下土层土壤水分含量一直维持在较高水平,土壤含水量基本在10%以上。由此可见,丘间地黏土层0—15 cm浅层土壤水分受到降雨影响波动较大,15 cm以下土层只有在大雨事件后有明显波动。

### 3.3 不同降雨量对丘间地黏土层土壤水分入渗深度的影响

对于白刺沙堆周围丘间地黏土层而言,不同降雨量对丘间地黏土层土壤水分入渗深度的影响有所不

同(图3)。5.7 mm的降雨只能影响0—5 cm土层的土壤水分,与降雨前土壤水分含量相比,5.7 mm的降雨使5 cm深度土层土壤水分含量增加2.2倍;11.9 mm的降雨对0—10 cm土层土壤水分产生显著影响,但是对10 cm以下土层土壤水分无显著影响。与降雨前相比,11.9 mm降雨分别使5 cm和10 cm土层深度土壤含水量提高2.6倍和1.4倍;20.1 mm的降雨对0—15 cm土层土壤水分产生显著影响,15 cm以下土层土壤水分没有变化,20.1 mm降雨分别使5,10和15 cm土层深度土壤含水量提高了2.8、2.3和1.9倍。27.8 mm的降雨对0—25 cm土层土壤水分均产生影响,土壤水分有不同程度的提高,分别使5,10,15,20和25 cm土层深度土壤水分提高了4.2、3.6、2.3、1.9和2.0倍;40.6 mm的降雨可以影响0—25 cm土层深度(甚至更深土层)的土壤水分,使不同土层深度的土壤水分含量大幅增加,分别使5,10,15,20和25 cm土层深度土壤水分提高4.7、3.5、3.1、2.8和2.7倍。

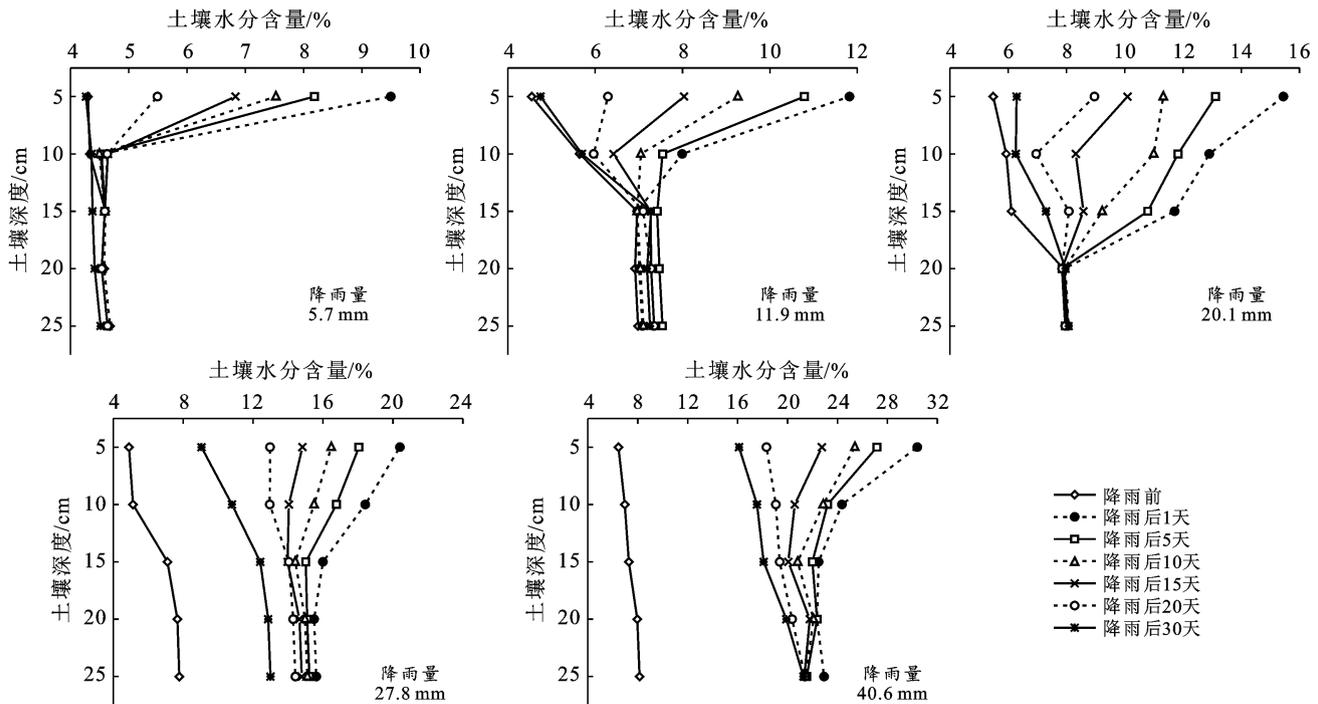


图3 丘间地黏土层土壤水分入渗深度对不同降雨量的响应

此外,图3显示,随着降雨后时间的延长,各土层土壤水分呈现缓慢下降的趋势。从降雨前后土壤水分变化过程可以看出,5.7和11.9 mm降雨下土壤水分恢复到雨前水平需要20 d的时间;而对于20.1 mm降雨而言,在降雨后20 d,5和10 cm土层土壤水分含量仍然较降雨前土壤水分含量高;对于27.8和40.6 mm降雨而言,在降雨后20 d,0—25 cm土层深度土壤水分含量仍然显著高于降雨前土壤水分。从

各土层土壤水分含量变化速率可以看出,5 cm和10 cm土层土壤水分含量在降雨后变化最大,土壤水分含量达到9.2%~30.4%,但随着降雨后时间的延长逐渐降低,15 cm以下土层土壤含水量在受到大雨事件影响后明显升高,土壤水分含量在10%以上,并且土壤水分下降极为缓慢。综上可知,对于丘间地黏土层而言,大雨事件对丘间地黏土层土壤水分具有明显的补给作用,并且降雨后土壤水分变化较为缓慢,

丘间地黏土层特殊的土壤结构能够抑制下层土壤水分蒸发,具有较好的保水作用。

### 3.4 降雨量、雨前土壤水分与丘间地黏土层土壤水分入渗深度的关系

降雨发生后,丘间地黏土层土壤水分将进一步下渗,从图 4 可以看出,降雨后丘间地黏土层土壤水分的最大下渗深度与降雨量大小呈显著的正相关关系,降雨量大小能够解释丘间地黏土层土壤水分最大入

渗深度的 88.1% ( $p < 0.001$ )。由线性拟合方程可知,降雨量平均每增加 1 mm,土壤水分下渗深度增加 0.57 cm。同时,降雨前土壤水分含量也是影响丘间地黏土层土壤水分下渗的重要因素,表现为雨前土壤水分含量越高,单位降雨量的下渗深度越小(图 4,  $p < 0.001$ ),雨前土壤水分含量每增加 1%,单位降雨量的下渗深度下降 0.02 cm,可见雨前土壤水分含量较高时反而不利于丘间地黏土层土壤水分的继续下渗。

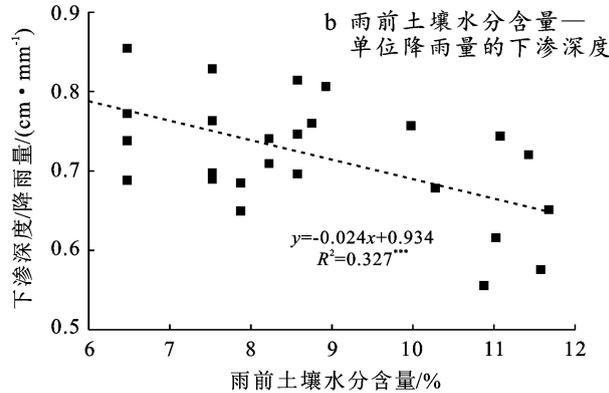
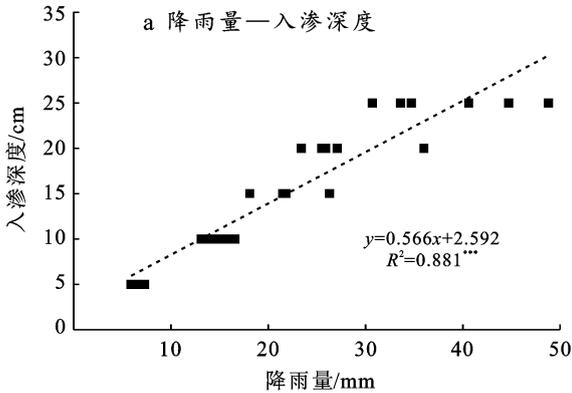


图 4 降雨后土壤水分下渗深度与降雨量及降雨前土壤水含量的关系

### 3.5 降雨量、雨前土壤水分与丘间地黏土层土壤水分保持时间的关系

从图 5 可以看出,降雨量大小对丘间地黏土层土壤水分保持时间的变化有显著影响。降雨量能够解释土壤水分保持时间 75.8% ( $p < 0.01$ )的变化,随着降雨量的增加,降雨后土壤水分保持时间呈现显著增加的趋势,降雨量平均每增加 1 mm,丘间地黏土层土壤水分保持时间增加 1.05 d,这说明大雨事件对于补充并维持丘间地黏土层土壤水分具有非常重要作

用。以 2021 年 3 月 31 日降雨为例,该次降雨量为 40.6 mm,通过土壤水分监测数据可知,10 cm 土层土壤水分经过 59 d 后才恢复到降雨前的水分含量。此外,图 5 表明降雨前土壤水分含量对降雨后丘间地黏土层土壤水分保持时间也有显著的正效应,雨前土壤水分含量越高,降雨后土壤水分保持时间越长,雨前土壤水分含量平均每增加 1%,丘间地黏土层土壤水分保持时间增加 9.85 d,这也表明丘间地黏土层土壤具有较好的蓄水性和保水性。

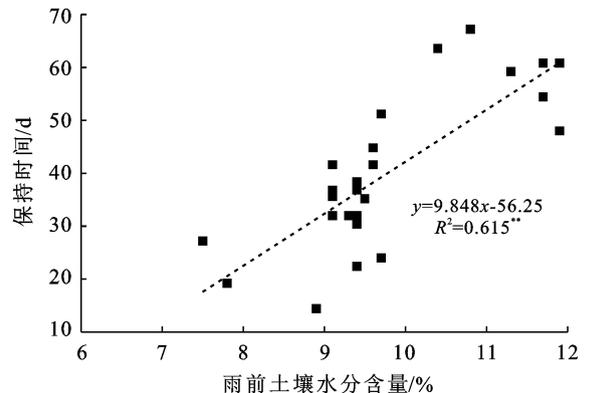
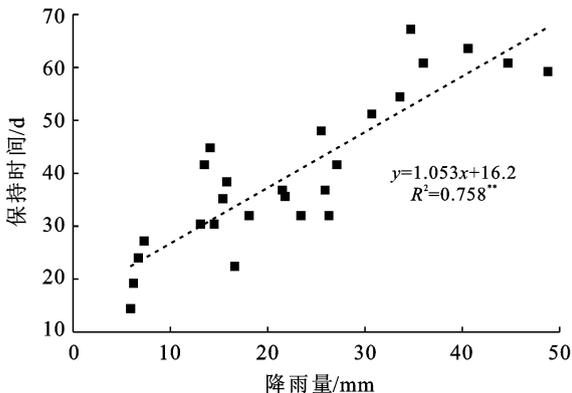


图 5 降雨后土壤水分保持时间与降雨量及降雨前土壤水含量的关系

## 4 讨论

### 4.1 影响丘间地黏土层土壤水分入渗的因素

土壤水分是土壤植物大气连续体(SPAC)系统中

降雨—产流—入渗 4 水转换的主要纽带<sup>[18-20]</sup>,降雨是研究区土壤水分补给的唯一来源,影响丘间地黏土层土壤水分入渗的因素可以为内因和外因,内因包括土壤质地、土壤结构、土壤容重、土壤孔隙度和土壤粒径

等在内的土介质的相关理化性质<sup>[21-23]</sup>, 外因包括降雨量、降雨强度、初始土壤水分含量、植被覆盖程度和地貌结构等自然或人为条件<sup>[24-28]</sup>。由于丘间地黏土层土壤质地十分紧密, 土壤颗粒组成中细颗粒含量较高, 并且大部分区域表层有一定盖度的物理结皮, 导致其表层具有较强的阻水能力, 较大的降雨后容易形成地表径流, 从而减少了降雨的入渗量, 因此限制了土壤水分的下渗<sup>[29]</sup>。同时, 降雨量大小是决定丘间地黏土层土壤水分补给深度的最重要因素<sup>[30]</sup>。本研究结果表明, 降雨后丘间地黏土层土壤水分的最大下渗深度与降雨量大小呈显著的正相关关系, 表现为降雨量平均每增加 1 mm, 土壤水分下渗深度增加 0.57 cm。此外, 降雨前土壤水分含量也是影响丘间地黏土层土壤水分下渗的重要因素, 表现为雨前土壤水分含量越高, 单位降雨量的下渗深度越小, 雨前土壤水分含量每增加 1%, 单位降雨量的下渗深度下降 0.02 cm, 雨前土壤水分含量过高能够抑制丘间地黏土层土壤水分的继续下渗。采用径流—入流—出流法测量结果表明, 土壤入渗性能与降雨量有显著的正相关关系, 但与初始土壤水分含量之间的关系为负相关关系, 而且随着降雨量的增加, 土壤水分含量变化对土壤入渗性能的影响程度逐渐降低<sup>[31]</sup>。李毅和邵明安<sup>[24]</sup>的研究结果也表明, 随着降雨量增大, 土壤入渗率和稳定入渗率均有增大的趋势, 上述研究结论与本研究结果基本一致。

#### 4.2 丘间地黏土层土壤水分空间格局及动态

不同大小的降雨量通过影响丘间地黏土层土壤水分入渗过程, 进一步影响土壤水分空间格局, 小于 10 mm 的降雨只能影响 10 cm 以内的土壤水分, 无法补给 10 cm 以下土壤水分, 只有较大降雨事件后才能充分补给黏土层 10 cm 以下土壤水分。从丘间地黏土层土壤水分年际变异特征来看, 丘间地黏土层土壤水分的变异程度较小, 在无降雨的条件下, 土层深度越深, 土壤水分含量越高, 其中土壤表层的平均水分含量最小, 深度越大土壤平均水分含量越大。在降雨过程中, 土壤水分受到降雨量、雨前土壤水分含量和土层深度等的影响出现不同程度的变化, 随着降雨后的时间延长, 丘间地黏土层表层土壤水分含量有所下降, 而下层土壤水分含量则是一个缓慢减少的过程, 越往深层土壤水分减少越慢。说明丘间地黏土层土壤水分的稳定性较好, 具有较好的蓄水保水效果。

## 5 结论

(1) 研究区域丘间地黏土层 0—25 cm 土层土壤水分的变异程度均为中度变异。表层(0—15 cm)土

壤水分变异性较大, 下层(15 cm 以下)土壤水分变异性较小。

(2) 大雨事件对丘间地黏土层土壤水分具有明显的补给作用, 降雨后土壤水分降低较为缓慢, 说明丘间地黏土层能够抑制下层土壤水分蒸发, 具有较好的蓄水保水效果。

(3) 降雨量大小与丘间地黏土层土壤水分入渗深度和土壤水分保持时间均具有显著的正相关关系, 雨前土壤水分含量过高会抑制丘间地土壤水分的继续下渗, 但对降雨后土壤水分保持时间有显著的正效应。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
- [2] 刘冰. 荒漠区灌木对降水脉动响应研究[D]. 北京: 中国科学院, 2009.
- [3] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 等. 固沙植被土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 85-89.
- [4] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [5] Qu Wenjie, Chen Lin, Wang Lei, et al. Local soil hydrological effects of nebkha creation in a degraded artificial Caragana shrubland [J]. Ecological Engineering, 2019, 131: 27-33.
- [6] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 339-350.
- [7] 李新乐, 吴波, 张建平, 等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 5701-5708.
- [8] 刘冰, 常学向, 李守波. 黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5194-5199.
- [9] 张定海. 固沙植被生态水文阈值研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [10] Keck H, Felde V J M N L, Drahorad S L, et al. Biological soil crusts cause subcritical water repellency in a sand dune ecosystem located along a rainfall gradient in the NW Negev desert, Israel [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(2): 133.
- [11] 刘冰, 赵文智, 常学向, 等. 黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 716-722.
- [12] Zhou Xueya, Guan Dexin, Wu Jiabing, et al. Soil water response to rainfall in a dune-interdune landscape in Horqin Sand Land, northern China [J]. Soil and Water Research, 2019, 14(4): 229-239.
- [13] 董义阳, 赵成义, 于志同, 等. 古尔班通古特沙漠南缘丘间地土壤水分特征曲线及模拟[J]. 水土保持学报,

- 2017,31(1):166-171.
- [14] 周学雅,杨婷婷,王安志,等.科尔沁沙地沙丘—丘间低地降雨前后土壤水分分布特征[J].生态学杂志,2017,36(1):157-163.
- [15] 阿拉木萨,蒋德明,骆永明.半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J].水土保持学报,2005,19(4):107-110.
- [16] 袁宏波,吴春荣,刘虎俊,等.干旱内陆沙区丘间地研究现状及存在问题[J].生态学杂志,2014,33(8):2245-2254.
- [17] 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.
- [18] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):251-259.
- [19] 庄季屏.四十年来的中国土壤水分研究[J].土壤学报,1989,26(3):241-248.
- [20] 樊毅.土壤水分入渗的影响因素概述[C].节水农业技术创新与生物节水交流研讨会,厦门:中国农业产业经济发展协会,2010:5-7.
- [21] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(5):537-540.
- [22] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J].太原理工大学学报,2006,37(1):59-62.
- [23] 李继文,尹本丰,索菲娅,等.荒漠结皮层藓类植物死亡对表层土壤水分蒸发和入渗的影响[J].生态学报,2021,41(16):6533-6541.
- [24] 李毅,邵明安.人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J].农业工程学报,2007,23(3):18-23.
- [25] 聂卫波,武世亮,马孝义,等.农田土壤入渗特性研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):31-37.
- [26] 石明明,王晓敏,陈奇,等.高寒草地干湿生态系统土壤水分及入渗对降水的响应[J].草业学报,2021,30(12):49-58.
- [27] 王博,段玉玺,王伟峰,等.人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J].干旱区研究,2020,37(4):881-889.
- [28] Wu Nan, Wang Hongling, Liang Shaoming, et al. Temporal-spatial dynamics of distribution patterns of microorganism relating to biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2006,51(1):124-131.
- [29] Kondo J. Time variation in soil water content of the surface soil layer after a rainfall [J]. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 1993,6(4):336-343.
- [30] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.
- [31] 李毅,邵明安.雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响[J].应用生态学报,2006,17(12):2271-2276.

(上接第 38 页)

- [20] 王洋,崔鹏,王兆印,等.泥石流龙头的形成及特征研究[J].水利学报,2017,48(4):473-479.
- [21] 吴坤鹏,刘时银,郭万钦.1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J].冰川冻土,2020,42(4):1115-1125.
- [22] Ge Yonggang, Cui Peng, Su Fenghuan, et al. Case history of the disastrous debris flows of Tianmo Watershed in Bomi County, Tibet, China: Some mitigation suggestions [J]. Journal of Mountain Science, 2014,11(5):1253-1265.
- [23] 屈永平,肖进,潘义为.藏东南地区冰川泥石流形成条件初步分析:以天摩沟冰川泥石流为例[J].水利水电技术 201849(12):177-184.
- [24] 国土资源部地质环境司.DZ/T0220-2006 泥石流灾害防治工程勘查规范[S].北京:中华人民共和国国土资源部,2006.
- [25] 李尧,崔一飞,李振洪,等.川藏铁路林波段冰川泥石流发育动态演化分析及监测预警方案[J].地球科学,2022,47(6):1969-1984.