

沙地土壤水分对降水事件的时空响应差异

贾瑞庭¹, 袁立敏¹, 杨制国^{1,2}, 黄海广^{1,2}, 胡小龙^{1,2}

(1. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010;

2. 内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 锡林郭勒盟 027300)

摘要: [目的] 揭示不同固定程度沙地土壤水分对降水事件的响应机制, 阐明其水分入渗与滞后效应的动态规律, 为浑善达克沙地生态系统的精准恢复与水资源可持续管理提供科学依据。[方法] 利用 2016—2021 年内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站监测数据, 系统采集了降水量、降水历时以及不同深度土层土壤含水量等关键指标。采用时间序列分析与统计比较方法, 重点解析了不同级别降水事件下各沙地类型土壤水分的入渗过程、时空变化特征及其滞后响应规律。[结果] (1) 2016—2021 年观测期内半固定沙地累计降水量 1 049.40 mm, I, II 级降水事件占总降水事件 67.83%, 降水量占总降水量的 23.84%; 流动沙地、固定沙地累计降水量 2 135.13 mm, I, II 级降水事件占总降水事件 63.40%, 降水量占总降水量的 11.37%。均呈现出为 I, II 级降水为主, III, IV, V 级降水的频率较低。(2) 观测期内枯水年为 2020 年, 其流动沙地和固定沙地降水量为 276.52 mm, 半固定沙地降水量为 130.60 mm。年内降水量均表现为单峰形态, 流动沙地、固定沙地降水量峰值时间为 6 月 (180.61 mm), 半固定沙地降水量峰值时间为 7 月 (54.00 mm)。年际间土壤平均含水量均表现为流动沙地 < 半固定沙地 < 固定沙地。(3) I, II 级降水事件未引起土壤下渗速率变化; III, IV, V 级降水事件土壤下渗速率均随着降水级别的增加呈增加趋势, 随着土层深度的增加呈增加趋势。流动沙地土壤下渗速率为 0.14~7.8 cm/h, 半固定沙地土壤下渗速率为 0.30~18.35 cm/h, 固定沙地土壤下渗速率为 0.26~11.64 cm/h。不同沙地类型土壤含水量对降水的响应均表现为先急剧增加后缓慢降低趋势, 流动沙地 20, 40, 60 cm 土层土壤峰值含水量响应时间分别为 14, 42, 86 h; 半固定沙地为 8, 12, 120 h; 固定沙地为 22, 28, 88 h。[结论] 浑善达克沙地土壤水分对降水的响应受沙地类型与降水级别共同调控, 仅 III 级以上降水可显著影响土壤下渗, 土壤持水性随沙地固定度增加而增强, 但水分响应速度减慢。

关键词: 土壤水分; 降水; 脉动响应; 浑善达克

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0170-08

Spatiotemporal response differences of soil moisture to precipitation events in sandy soils

Jia Ruiting¹, Yuan Limin¹, Yang Zhiguo^{1,2}, Huang Haiguang^{1,2}, Hu Xiaolong^{1,2}

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China; 2. Inner Mongolia Duolun National

Positioning Observation Station of the Hunshandak Sandy Land Ecosystem, Xilingol, Inner Mongolia 027300, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the response mechanisms of soil moisture to precipitation events across sandy lands with different fixation degrees (shifting, semi-fixed, and fixed), and to clarify the dynamic patterns of water infiltration and hysteresis effects. The goal is to provide a scientific basis for the precise restoration of ecosystems and sustainable water resource management in the Hunshandak Sandy Land. [Methods] Utilizing monitoring data (2016—2021) from the National Positioning Observation Station of the Hunshandak Sandy Land Ecosystem in Duolun, Inner Mongolia, key indicators including precipitation amount, duration, and soil moisture content at various depths were systematically collected. Time series

收稿日期: 2025-05-28

修回日期: 2025-06-22

接受日期: 2025-07-14

资助项目: 内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目“‘三北’工程区林草生态产业模式研究与示范”(2024NLTS05)

第一作者: 贾瑞庭(1993—), 男, 陕西榆林人, 硕士, 研究实习生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: jiaruiting@126.com

通信作者: 袁立敏(1982—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 主要从事荒漠土壤资源利用与保护研究。E-mail: nmg yuanlm@163.com

<https://stbj.publish.founderss.cn>

analysis and statistical comparison methods were employed to analyze the infiltration process, spatiotemporal variation characteristics, and hysteresis response of soil moisture under different levels of precipitation events. [Results] (1) During the observation period, the total precipitation was 1 049.40 mm for the semi-fixed sandy land and 2 135.13 mm for the shifting and fixed sandy lands. Grade I and II precipitation events dominated in frequency (67.83% and 63.40%, respectively), but contributed less to total precipitation (23.84% and 11.37%, respectively), while Grade III—V precipitation events occurred less frequently. (2) The dry year was 2020, with annual precipitation of 276.52 mm for shifting and fixed sandy land and 130.60 mm for semi-fixed sandy land. Intra-annual precipitation showed a unimodal pattern, peaking in June (180.61 mm) for shifting and fixed sandy land and July (54.00 mm) for semi-fixed sandy land. The inter-annual average soil moisture content consistently followed the order: shifting sandy land < semi-fixed sandy land < fixed sandy land. (3) No change in soil infiltration rate was observed for Grade I and II events. In contrast, the infiltration rate for Grade III—V events increased with both precipitation grade and soil depth. The infiltration rates ranged from 0.14~7.8 cm/h, 0.30~18.35 cm/h, and 0.26~11.64 cm/h for shifting, semi-fixed, and fixed sandy lands, respectively. The soil water content response to precipitation exhibited a rapid increase followed by a slow decrease. The peak response times at 20, 40, 60 cm depths were 14, 42, 86 h for shifting sandy land; 8, 12, 120 h for semi-fixed sandy land; and 22, 28, 88 h for fixed sandy land. [Conclusion] The response of soil moisture to precipitation in the Hunshandak Sandy Land is co-regulated by sandy land type and precipitation grade. Only precipitation events above Grade III significantly influence soil infiltration. Soil water retention capacity increases with the degree of fixation, while the moisture response speed decreases.

Keywords: soil moisture; precipitation; pulse response; Hunshandak

土壤水分作为土壤的重要组成部分,是矿质养分迁移、化学物质溶解和热量传递的核心载体^[1-3]。土壤含水量是反映土壤水分动态变化关键指标,主要受降水量、降水强度、降水频率等指标的影响,同时也受土壤质地、土层深度的影响^[4],一定量、一定强度的降水发生后,土壤含水量会呈快速增大趋势,之后由于植物蒸腾、土壤蒸发等因素,土壤含水量呈缓慢降低趋势,这一过程无其他降水干扰情况称为土壤水分对降水的脉动响应^[5-6]。

目前,针对土壤水分与降水格局开展了大量相关研究,包括土壤初始状况对水平入渗的影响^[7-8],降水入渗和蒸发特征^[9-10],植物群落土壤水分动态特征^[11-14],降水入参与再分配规律特征等^[15-16],上述研究主要围绕不同地区植被类型、土地利用类型及林分类型等展开了广泛的讨论,但已有研究中对不同沙化土地类型对降水的响应特征研究相对较少,在沙漠、沙地区域,土壤水分的主要补给方式为降水,土壤水分的时空变异性是植被生长发育的制约性因子^[17-18],因此研究沙地土壤水分对降水的响应对揭示区域水分动态变化和植被恢复均具有重要意义。

基于此,本文选取浑善达克沙地的流动沙地、半固定沙地、固定沙地为研究对象,基于降水和土壤含水量的连续动态监测,分析土壤含水量时间动态、空间分布以及降水入渗等特征,探讨不同沙地类型土

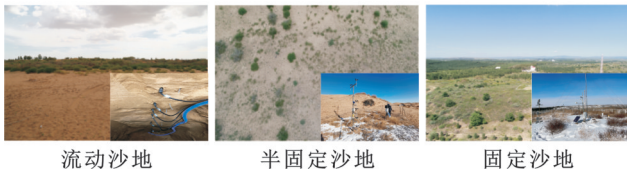
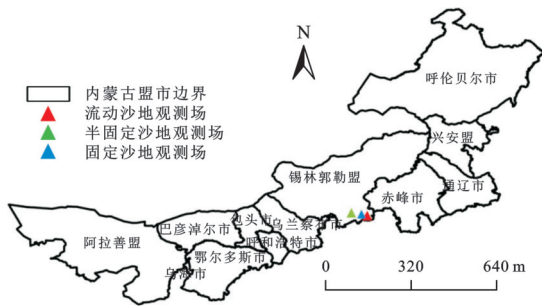
壤含水量对降水的响应特征,以期为区域生态系统建设提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站内选取3种典型沙地类型作为研究对象(图1),3种典型沙地均位于浑善达克沙地南缘,其中流动沙地(116°29'E,42°12'N)和固定沙地(116°29'E,42°8'N)行政区划隶属多伦县,固定沙地(115°9'E,42°44'N)行政区划隶属正镶白旗。研究区属中温带半干旱大陆性季风气候;降水量少且分布不均,正镶白旗年均降水量326.00 mm,多伦县年均降水量385.00 mm,7—9月降水量占全年降水量的65%以上。主要地带性土壤以栗钙土为主,非地带性土壤主要为风沙土,东部为草甸栗钙土或暗栗钙土,向西逐渐演变为淡栗钙土,到西北部则过渡为棕钙土,沙地内广泛分布的非地带性土壤风沙土大多呈坨(沙丘)、甸(丘间低地)相间分布或沙丘链与甸子地交错排列。植被类型为典型草原、草甸草原和沙地植被^[19-21],乔木植物种为白榆(*Ulmus pumila*)、樟子松(*Pinus sylvestris*),灌木植物种小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、杨柴(*Hedysarum leave*)、黄柳(*Salix gordejewii*),草本植物种为羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa*

grandis)、冰草 (*Leynus secalinus*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、菊叶委陵菜 (*Potentilla tanacetifolia*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 试验设计

于研究区内选择流动沙地、半固定沙地和固定沙地设为试验观测场,观测时间2016—2021年,试验观测场分别设小型自动气象站和土壤含水量监测系统,其中流动沙地和固定沙地直线距离为7.4 km,两试验观测场为同一降水区域,共用一套小型自动气象站。小型自动气象站观测仪器为TYD-ZS2型自计雨量筒,雨量传感器为TR525M型,测量精度0.1 mm,记录仪时间30 min/次。土壤含水量监测系统观测仪器为HOB0H21型土壤水分自动记录仪,水分传感器型号为EC-5土壤水分传感器,土壤水分分辨率0.1%,传感器安置深度分别为20,40,60 cm土层的水平位置,记录仪时间30 min/次。

1.3 研究方法

(1) 降水事件选取:降水间隔时间大于24 h,作为两次独立的降水事件,降水历时为降水事件开始至结束的时间。并将降水事件按降水量分为I(0.1~2 mm)、II(2.1~5 mm)、III(5.1~10 mm)、IV(10.1~18 mm)、V(>18 mm)5个等级^[22-23]。

(2) 统计与分析。

$$W = VWC \times h \quad (1)$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (2)$$

式中:W为土壤储水量(cm);VWC为土壤体积含水量(%);h为土层厚度(cm)。 ΔW 为每次降水事件后土壤储水量增量(cm); W_2 为降水事件发生后的最大储水量(cm); W_1 为降水事件发生前的初始储水量(cm)。

$$V = \Delta W / T \quad (3)$$

式中:V为土壤入渗速率(cm/h); ΔW 为每次降水事件后土壤储水量增量(cm);T为降水发生的时间与土壤含水量峰值出现时间的差值(h)。

2 结果与分析

2.1 降水特征

分析试验观测场2016—2021年降水资料,并参考石明明^[22]、常昌明^[23]等将降水事件按降水量分为5个等级,详情见表1。观测期内半固定沙地累计降水量1 049.40 mm,降水事件230次;I,II级降水事件占总降水事件67.83%,降水量占总降水量的23.84%。流动沙地、固定沙地累计降水量2 135.13 mm,降水事件418次;I,II级降水事件占总降水事件63.40%,降水量占总降水量的11.37%。半固定沙地、流动沙地和固定沙地以无降水天气为主,无降水日数分别占总日数的86.36%,80.74%,均呈现出为I,II级降水为主,III,IV,V级降水的频率较低,但III,IV,V级降水事件对总降水量的贡献较大。

2.2 土壤水分动态变化

浑善达克沙地年际降水量与土壤含水量动态变化见图2,流动沙地和固定沙地属于同一降水区域,枯水年2020年降水量为276.52 mm;半固定沙地枯水年2020年降水量为130.60 mm。

流动沙地(图2A)、半固定沙地(图2B)、固定沙地(图2C)土壤含水量年际变化均表现为先降低后增大的趋势,含水量分别为1.76%~3.12%,3.57%~6.37%,1.92%~8.04%,最低值均出现在2019年;年际间土壤平均含水量均表现为流动沙地<半固定沙地<固定沙地,不同土层土壤含水量差异表现为流动沙地土壤含水量受年内降水量和蒸发量的影响,0—60 cm土层深度土壤含水量高于0—20 cm,0—40 cm;半固定沙地、固定沙地土壤含水量受年内降水量、蒸发量、植物根系生长等共同作用,表现为0—20 cm深度土壤含水量高于0—40 cm,0—60 cm。

浑善达克沙地年内降水量与土壤含水量动态变化见图3,流动沙地(图3A)、半固定沙地(图3B)、固定沙地(图3C)观测期间降水量均表现为单峰形态,流动沙地、固定沙地降水量峰值时间为6月(180.61 mm),半固定沙地降水量峰值时间为7月(54.00 mm)。流动沙地土壤含水量年内变化表现为先增大后降低趋势,土壤含水量峰值时间均为7月;半固定沙地5—9月由于植被耗水作用土壤含水量呈降低趋势;固定沙地5—9月生长季内降水量增加及植被生长耗水共同作用,土壤含水量无明显规律性变化。

表 1 2016—2021 年降水特征
Table 1 Precipitation characteristics (2016—2021)

沙地类型	降水级别	降水事件	降水量/mm	降水历时/h	降水强度/(mm·h ⁻¹)
半固定沙地	I	104	88.20	212.50	0.42
	II	52	162.00	219.50	0.74
	III	44	307.60	295.50	1.04
	IV	18	204.60	200.00	1.02
	V	12	287.00	236.00	1.22
固定沙地/流动沙地	I	177	54.87	160.85	0.51
	II	88	187.87	577.02	0.49
	III	58	271.53	426.35	0.96
	IV	38	343.26	440.21	1.17
	V	57	1277.61	1150.84	1.67

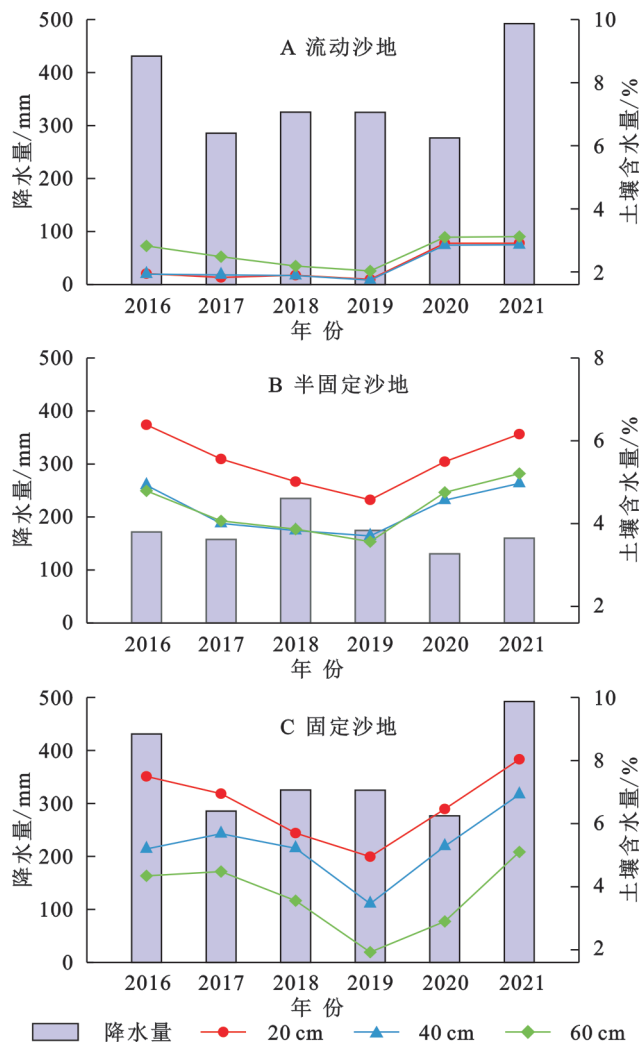


图 2 年际降水量与土壤含水量动态变化

Fig. 2 Interannual precipitation and dynamic changes of soil moisture content

2.3 降水下渗特征

下渗速率表征土壤含水量对降水的响应时滞,沙地各降水强度下渗速率见表 2, I, II 级降水事件因降水量、降水强度较低,降水对土壤补给作用微弱,未引

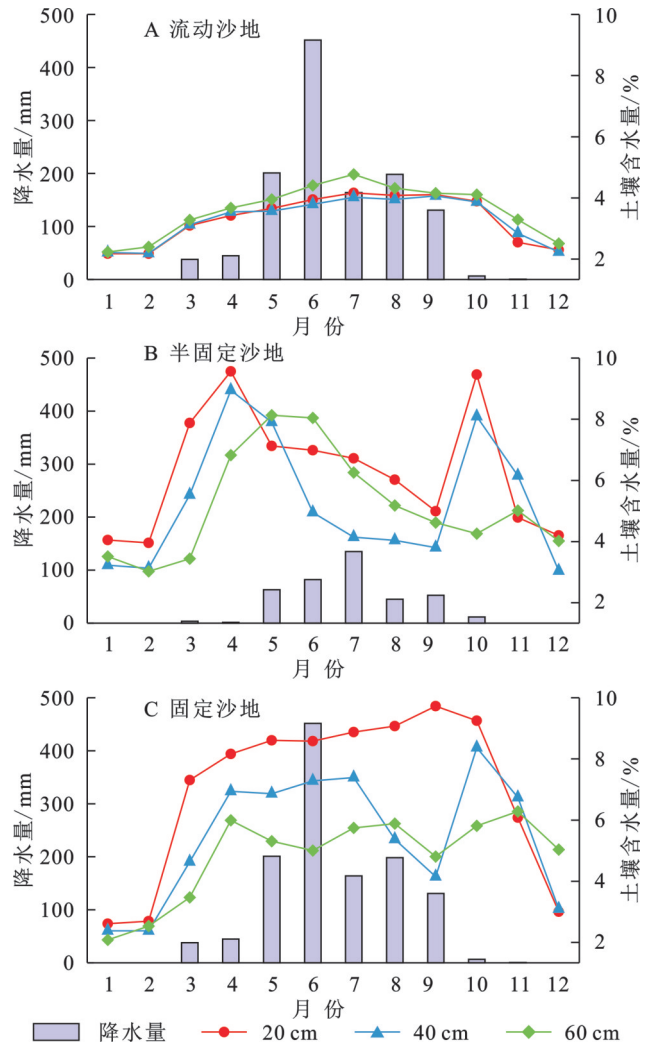


图 3 年内降水量与土壤含水量动态变化

Fig. 3 Intra-annual dynamics changes of precipitation and soil water content

起土壤下渗速率变化。III, IV, V 级降水事件土壤下渗速率均随着降水级别的增加呈增加趋势,随着土层深度的增加呈增加趋势;流动沙地土壤下渗速率为 0.4~7.8 cm/h,半固定沙地土壤下渗速率为 0.30~8.35 cm/

h, 固定沙地土壤下渗速率为 0.26~0.64 cm/h; 20 cm, 流动沙地 > 固定沙地 > 流动沙地, 40 cm 土层表现为固定沙地 > 流动定沙地 > 半固定沙地。

表 2 各量级降水下渗速率

Table 2 Infiltration rates under different precipitation levels

沙地类型	降水级别	降水量	降水强度/ (mm·h ⁻¹)	下渗速率/(cm·h ⁻¹)		
				20 cm 土层	40 cm 土层	60 cm 土层
流动沙地	Ⅲ ((5.1~10 mm))	9.94	1.11	0.40	0.40	0.17
	Ⅳ (10.1~18 mm)	16.76	2.83	3.60	1.20	0.14
	V > 18 mm	26.16	2.01	7.80	2.80	0.43
半固定沙地	Ⅲ ((5.1~10 mm))	9.80	1.51	15.03	0.06	—
	Ⅳ (10.1~18 mm)	13.20	1.47	15.61	0.31	0.30
	V > 18 mm	25.60	2.33	18.35	7.62	3.08
固定沙地	Ⅲ ((5.1~10 mm))	9.94	1.12	3.57	0.74	—
	Ⅳ (10.1~18 mm)	16.76	2.83	8.86	2.15	0.26
	V > 18 mm	26.11	2.01	11.64	9.60	0.93

注:“—”代表未发现。

2.4 土壤水分对降水的响应过程

选取观测期内典型独立降水事件分析土壤含水量对降水的响应过程,该降水事件前 97~142 h 无降水发生,降水事件后 259~310.5 h 无降水发生,因此忽略其他降水事件的影响。图 4 为沙地土壤含水量对降水的响应过程,不同沙地类型土壤含水量对降水的响应均表现为先急剧增加后缓慢降低趋势,差异表现为不同沙地类型土壤含水量对降水的响应时间不同。

流动沙地(图 4A)20,40,60 cm 土层土壤初始含水量分别为 2.80%,2.90%,2.90%,降水事件开始 14,42,86 h 后土壤含水量增加至峰值,较土壤初始含水量增加 96.43%,48.00%,10.34%。半固定沙地(图 4B)

20,40,60 cm 土层壤初始含水量分别为 12.81%,10.27%,10.02%,降水事件开始 8,12,120 h 后土壤含水量增加至峰值,较土壤初始含水量增加 57.30%,33.78%,3.19%。固定沙地(图 4C)20,40,60 cm 土层土壤初始含水量分别为 9.04%,9.25%,6.78%,降水事件开始 22,28,88 h 后土壤含水量增加至峰值,较土壤初始含水量增加 65.04%,33.84%,6.49%。3 种沙地土壤水分对降水事件的响应均呈现为迅速增加至峰值后缓慢降低趋势,由于流动沙地土壤初始含水量较低、固定沙地地表枯落物等原因,其差异表现为半固定沙地 20,40 cm 土层土壤峰值含水量的响应时间均低于流动沙地和固定沙地,流动沙地土壤峰值含水量增量均高于半固定和固定沙地。

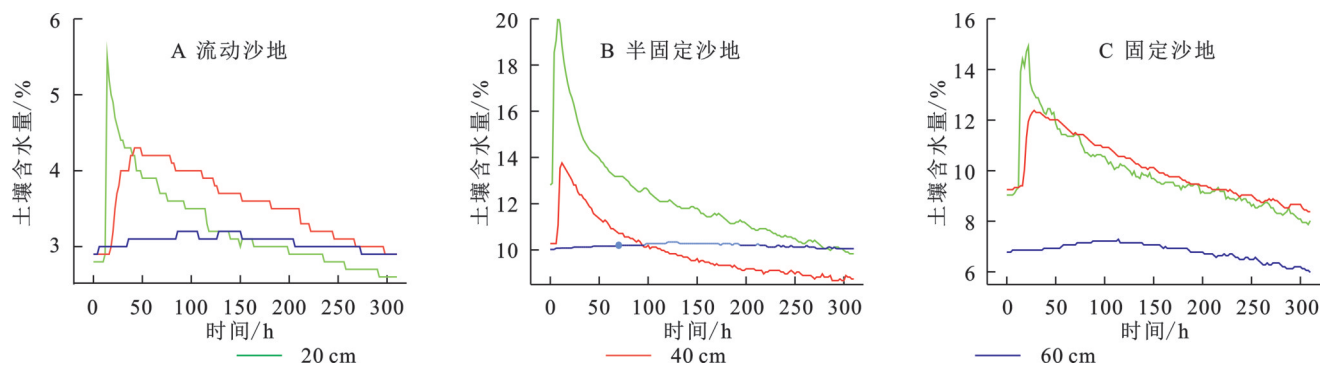


图 4 土壤水分对降水的响应
Fig. 4 Response of soil moisture to precipitation

3 讨论

3.1 降水特征

沙地土壤水分的主要来源是大气降水,降水格局、植被特征、土壤类型等因素直接影响土壤水分状况^[24]。通过年降水资料分析表明,流动沙地、固定沙

地的试验观测场 2016—2021 年总降水量为 2 135.13 mm,降水事件 418,无降水日数占总日数的 80.74%;半固定沙地试验观测场总降水量为 1 049.40 mm,降水事件 230 次,无降水日数占总日数的 80.74%,流动沙地、固定沙地试验观测场降水特征优于半固定试验观测场,但均呈现出以小降水为主,发生大降水的

频率较低,但大降水对总降水量的贡献较大,这与特日格勒等^[25]的研究一致。

浑善达克沙地2020年为枯水年,土壤水分随着降水量年际变化表现为先降低再增大的趋势。半固定沙地试验观测场,流动沙地、固定沙地试验观测场年内降水量呈单峰形态,峰值时间为6月,峰值为分别为32.80,180.61 mm,5—9月降水量占年降水量的92%以上;年内土壤水分表现为恢复期和波动期,在恢复期1—4月随着气温的升高,早春积雪融化,土壤解冻,土壤水分呈增加趋势,土壤水分维持在0.91%~11.35%,不同类型沙地土壤含水量表现为半固定沙地>固定沙地>流动沙地;波动期内由于降水量增加、土壤蒸发、植物蒸腾等因子共同作用,不同深度的土壤含水量波动存在差异,土壤水分表现为骤升骤降的脉冲式特点^[13]。

3.2 土壤水分对降水的动态响应

下渗速率反映土壤水分对降水响应时滞的重要指标,受降水量、降水历时、降水强度的直接影响,本研究结果显示,0~5 mm降水量对土壤水分补给作用微弱,未引起土壤含水量增加,魏雅芬等^[26]对降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应研究指出,5.0 mm以下的降雨一般有增加空气湿度、降温的作用,一定程度上可以缓解旱情;5.0 mm以上的降雨才能有效补充土壤水分^[27]。随着土层深度的增加,下渗速率降幅明显,即滞后性的表现更加明显^[28]。

本研究结果显示,土壤水分对降水的响应过程表现为先快速增加后缓慢降低趋势,陈敏玲等^[29]研究指出表层土壤含水量的变化过程可用指数方程来模拟,本研究与其一致。差异表现为不同沙地类型、不同土层深度对降水的响应时滞性不同,流动沙地、半固定沙地、固定沙地20 cm土层深度土壤含水量对降水的响应峰值时间14,8,22 h,土壤峰值含水量较初始含水量增加96.43%,57.30%,65.04%;固定沙地由于植被冠层截留和凋落物层的影响,降水能被土壤吸收地较少,因此土壤含水量对降水的响应峰值时间高于其他沙地,土壤峰值水分较初始水分增加率低于其他沙地。

4 结论

(1) 2016—2021年观测期内半固定沙地累计降水量1 049.40 mm,Ⅰ,Ⅱ级降水事件占总降水事件67.83%,降水量占总降水量的23.84%;流动沙地、固定沙地累计降水量2 135.13 mm,Ⅰ,Ⅱ级降水事件占总降水事件63.40%,降水量占总降水量的11.37%。均呈现出以Ⅰ,Ⅱ级降水为主,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ级降水的频

率较低,但对总降水量的贡献较大。

(2) 观测期内枯水年为2020年,其流动沙地和固定沙地降水量为276.52 mm,半固定沙地降水量为130.60 mm。年内降水量均表现为单峰形态,流动沙地、固定沙地降水量峰值时间为6月(180.61 mm),半固定沙地降水量峰值时间为7月(54.00 mm)。年际间土壤平均含水量均表现为流动沙地<半固定沙地<固定沙地;流动沙地土壤含水量年内变化表现为先增大后降低趋势,土壤含水量峰值时间均为7月,半固定沙地5—9月由于植被耗水作用土壤含水量呈降低趋势;固定沙地5—9月生长季内降水量增加及植被生长耗水共同作用,土壤含水量无明显规律性变化。

(3) Ⅰ,Ⅱ级降水事件未引起土壤下渗速率变化;Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ级降水事件土壤下渗速率均随着降水级别的增加呈增加趋势,随着土层深度的增加呈增加趋势,流动沙地土壤下渗速率为0.14~7.8 cm/h,半固定沙地土壤下渗速率为0.30~18.35 cm/h,固定沙地土壤下渗速率为0.26~11.64 cm/h。不同沙地类型土壤含水量对降水的响应均表现为先急剧增加后缓慢降低趋势,流动沙地20,40,60 cm土层土壤峰值含水量响应时间分别为14,42,86 h,较土壤初始含水量增加96.43%,48.00%,10.34%;半固定沙地20,40,60 cm土层土壤峰值含水量响应时间分别为8,12,120 h,较土壤初始含水量增加57.30%,33.78%,3.19%;固定沙地20,40,60 cm土层土壤峰值含水量响应时间分别为22,28,88 h,较土壤初始含水量增加65.04%,33.84%,6.49%。

参考文献(References):

- [1] 何其华,何永华,包维楷.干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J].山地学报,2003,21(2):149-156.
He Q H, He Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Journal of Mountain Science 2003,21(2):149-156.
- [2] Rötzer K, Montzka C, Bogen H, et al. Catchment scale validation of SMOS and ASCAT soil moisture products using hydrological modeling and temporal stability analysis[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:934-946.
- [3] 张存厚,段晓凤,杨丽萍,等.草甸草原降水特征与土壤水分对降水脉动响应:以呼伦贝尔草原额尔古纳市为例[J].干旱区地理,2022,45(6):1881-1889.
Zhang C H, Duan X F, Yang L P, et al. Characteristics of precipitation and response of soil moisture to precipitation pulse in meadow steppe: a case of Ergun City in Hulunbuir steppe [J]. Arid Land Geography, 2022, 45 (6):1881-1889.
- [4] 邹慧,高光耀,朱斌,等.黄土高原恢复草地土壤水分对降水响应及模拟[J].干旱区研究,2020,37(4):890-898.

- Zou H, Gao G Y, Zhu B, et al. Modeling of the response of soil moisture to precipitation in the restored grasslands of the Loess Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(4):890-898.
- [5] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2):254-268.
- [6] Liu X Z, Wan S Q, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2):213-223.
- [7] 王新平, 康尔泗, 李新荣, 等. 荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4):592-596.
Wang X P, Kang E S, Li X R, et al. The influence of initial soil conditions on water penetration and soil moisture distribution[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4):592-596.
- [8] 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.
Liu H, Lei T W, Zhao J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on loess infiltration capacity[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2):1-6.
- [9] 岳艳鹏, 成龙, 孙迎涛, 等. 毛乌素沙地生物结皮覆盖区土壤水分收支变化特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7):1861-1870.
Yue Y P, Cheng L, Sun Y T, et al. Changes of soil water budget in the area covered by biological soil crusts in Mu Us sandy land, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7):1861-1870.
- [10] 原鹏飞, 丁国栋, 王炜炜, 等. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4):23-27.
Yuan P F, Ding G D, Wang W W, et al. Characteristics of rainwater infiltration and evaporation in Mu Us Sandland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(4):23-27.
- [11] 于晓娜, 李恩贵, 黄永梅, 等. 毛乌素沙地油蒿 (*Artemisia ordosica*) 群落土壤水分动态特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3):674-682.
Yu X N, Li E G, Huang Y M, et al. Soil moisture dynamics of *Artemisia ordosica* communities in the Mu Us sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3):674-682.
- [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 Y X, Wang X P, Su Y G, et al. Temporal stability of surface soil moisture in artificially revegetated desert area [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1):81-86.
- [13] 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(15):5701-5708.
Li X L, Wu B, Zhang J P, et al. Dynamics of shallow soil water content in *Nitraria tangutorum* nebkha and response to rainfall [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15):5701-5708.
- [14] 冯伟, 李卫, 杨文斌, 等. 毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3):101-107.
Feng W, Li W, Yang W B, et al. Dynamic response of soil moisture to rainfall in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest of Mu Us sandy land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3):101-107.
- [15] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入参与再分配规律研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(6):1234-1241.
Wang X P, Li X R, Kang E S, et al. The infiltration and redistribution of precipitation in revegetated sand dunes in the Tengger Desert, Shapotou, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6):1234-1241.
- [16] 徐先英, 刘士余, 柴成武, 等. 民勤沙井子典型固沙植被区土壤水分动态与降水再分配研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6):229-234, 239.
Xu X Y, Liu S Y, Chai C W, et al. Dynamics of soil water and redistributions of precipitation in the main sand-fixing shrub woodlands in Shajingzi of Minqin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6):229-234, 239.
- [17] 陈林, 宋乃平, 杨新国, 等. 荒漠草原不同土地利用类型土壤水分对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):153-160.
Chen L, Song N P, Yang X G, et al. Responses of soil moisture to precipitation under three typical land-use patterns in desert steppe [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):153-160.
- [18] 罗叙, 李建平, 张翼, 等. 荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4):142-150, 158.
Luo X, Li J P, Zhang Y, et al. Response of spatial and temporal variation of soil moisture to precipitation change in desert steppe [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4):142-150, 158.
- [19] 佟喜梅. 正镶白旗土地荒漠化动态变化及原因分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008.
Tong X M. The analyze of dynamic change and cause of land desertification of the Zheng Xiang Bai Banner [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008.
- [20] 胡小龙. 内蒙古多伦县退化草地生态恢复研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
Hu X L. Study on ecological restoration of degraded

- grassland in Duolun County [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [21] 王雨晴. 气候与地形因子对浑善达克沙地 ANPP 的影响: 以多伦县为例 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. Wang Y Q. Effects of climate and terrain factors on ANPP in Hunshandake sandy land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [22] 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. Shi M M, Wang X M, Chen Q, et al. Responses of soil moisture to precipitation and infiltration in dry and wet alpine grassland ecosystems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 49-58.
- [23] 常昌明, 牛建明, 王海, 等. 小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 260-265. Chang C M, Niu J M, Wang H, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall in a *Stipa klemenzii* steppe [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 260-265.
- [24] 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. Yan D R, Huang H G, Hu X L, et al. Soil water dynamics of sand fixation vegetations and the responses to precipitation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4): 85-89.
- [25] 特日格勒, 冯伟, 杨文斌, 等. 浑善达克沙地土壤水分深层渗漏的动态特征 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 77-82. Te R, Feng W, Yang W B, et al. Dynamic characteristics of deep soil water leakage in Otindag sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 77-82.
- [26] 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. Wei Y F, Guo K, Chen J Q. Effect of precipitation pattern on recruitment of soil water in Kubuqi desert, northwestern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [27] 沈菊, 辛萍萍, 杨起楠, 等. 柴达木盆地东部浅层土壤水分增量对降水的响应 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(35): 54-61. Shen J, Xin P P, Yang Q N, et al. Response of shallow soil moisture increment to precipitation in eastern Qaidam Basin [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(35): 54-61.
- [28] 付晨馨, 种培芳, 周海, 等. 河西走廊绿洲边缘降水对土壤水分特征的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(1): 137-145, 155. Fu C X, Chong P F, Zhou H, et al. Effect of precipitation on soil moisture characteristics at the oasis edge of the Hexi Corridor [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(1): 137-145, 155.
- [29] 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 等. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(7): 658-668. Chen M L, Zhang B W, Ren T T, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(7): 658-668.

(上接第 169 页)

- [26] 樊艳玲, 苟雅玲, 王红旗, 等. 氯代烃污染深层土壤细菌群落结构及组装机制 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5550-5561. Fan Y L, Gou Y L, Wang H Q, et al. Structure and assembly mechanism of bacterial communities in deep soil contaminated by chlorinated hydrocarbons [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5550-5561.
- [27] Dini-Andreote F, Stegen J C, van Elsland J D, et al. Disentangling mechanisms that mediate the balance between stochastic and deterministic processes in microbial succession [J]. PNAS 2015, 112(11): E1326-E1332.
- [28] 常博然, 陈茹岚, 蓝天, 等. 西藏折拉山森林不同土层土壤细菌群落的海拔分布格局及驱动因子 [J/OL]. 环境科学, 2024: 1-18. (2024-12-24). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjck.202410008>. Chang B R, Chen R L, Lan T, et al. Altitudinal distribution pattern of soil bacterial communities in different soil layers and driving factors in the forests of Mountain Zhela, Xizang [J/OL]. Environmental Science, 2024: 1-18. (2024-12-24). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjck.202410008>.
- [29] Yin X B, Wang W T, Wang A H, et al. Microbial community structure and metabolic potential in the coastal sediments around the Yellow River Estuary [J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151582.
- [30] Naz M, Dai Z C, Hussain S, et al. The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115770.