

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.041.

胡安焱, 付稳东, 陈云飞, 等. 毛乌素沙地不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 133-142.

Hu Anyan, Fu Wendong, Chen Yunfei, et al. Soil Moisture Dynamics and Its Response to Precipitation in Different Cover Types of the Mu Us Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 133-142.

毛乌素沙地不同覆被类型土壤水分动态 及其对降水的响应

胡安焱^{1,2}, 付稳东^{1,2}, 陈云飞^{1,2}, 颜林^{1,2},

艾美霞³, 陈瑞³, 石长春⁴, 刘秀花^{1,2}

(1.长安大学 水利与环境学院, 西安 710054;

2.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3.榆林市水利局, 陕西 榆林 719000;

4.陕西省治沙研究所陕西榆林毛乌素沙地荒漠生态系统国家定位观测研究站, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 分析不同覆被类型下土壤水分时空变化特征及对降雨的响应, 探讨覆被类型对土壤水文的重塑过程, 为优化毛乌素沙地植物覆盖类型和提高土壤水分的植被承载力提供科学依据。 [方法] 以陕西榆林市毛乌素沙地典型覆被类型草地、沙柳地和裸地为研究对象, 通过全年原位试验监测和经典统计学分析相结合的方法, 分析 0—150 cm 土壤水分动态及其对降水的响应。 [结果] (1) 在全年尺度, 受植被根系分布和耗水差异的影响, 典型覆被类型土壤水分可分为稳定期(12月至次年2月)、积累期(3—5月)、消耗期(6—8月)和恢复期(9—11月), 降水补给土壤水分主要发生在积累期和恢复期。土壤剖面水分表现出明显的空间分异, 草地在 20 cm 较高, 沙柳地在 50 cm 和 150 cm 处较高。草地主要利用深度 0—50 cm 的土壤水, 沙柳主要利用 50—100 cm 的土壤水。(2) 沙柳地和草地的土壤水分在浅层(0—50 cm)对降水的响应比裸地慢, 深层(50—150 cm)则比裸地快。(3) 降水补给深度与降水量呈显著正相关, 而响应滞后时间与降水历时呈显著正相关($p < 0.05$)。 [结论] 植被类型、降水历时、降水强度、冻融过程影响着土壤剖面水分再分配, 主导植被类型在降水格局变化下的演替。

关键词: 毛乌素沙地; 土壤水分动态; 降雨入渗; 覆被类型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0133-10

Soil Moisture Dynamics and Its Response to Precipitation in Different Cover Types of the Mu Us Sandy Land

Hu Anyan^{1,2}, Fu Wendong^{1,2}, Chen Yunfei^{1,2}, Yan Lin^{1,2}, Ai Meixia³,

Chen Rui³, Shi Changchun⁴, Liu Xiuhua^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Water Conservancy Bureau of Yulin, Yulin, Shaanxi 719000, China; 4. Shaanxi Institute of Desert Control Shaanxi Yulin Mu Us Desert Ecosystem National Observation and Research Station, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics of soil moisture and its response to rainfall under different cover types were analyzed, and the remodeling process of cover types on soil hydrology was discussed, which provided scientific basis for optimizing plant cover types and improving vegetation carrying capacity of soil moisture in Mu Us sandy land. [Methods] Grassland, salix land and bare land in Mu Us sandy land in Yulin City of Shaanxi Province were taken as research objects. The soil water dynamics in 0—150 cm layer and its response to precipitation were analyzed by combining annual in-situ observation and

收稿日期: 2022-11-02

修回日期: 2022-12-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877179, 41901034, 42001033); 陕西省自然科学基金研究计划(2021JQ-237); 中央高校基本科研业务费项目(300102291507, 300102292904); 陕西省哲学社会科学研究专项(2022HZ1859)

第一作者: 胡安焱(1970—), 男, 四川泸县人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源与生态环境研究。E-mail: huanyan97@163.com

通信作者: 刘秀花(1968—), 女, 陕西绥德人, 博士, 教授, 主要从事水文生态与水文安全研究。E-mail: liuxh68@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

classical statistical analysis. [Results] (1) At the annual scale, affected by the difference of vegetation root distribution and water consumption, the soil moisture of typical cover types could be divided into stable period (December to February of the following year), accumulation period (March to May), consumption period (June to August) and recovery period (September to November). Soil profile moisture showed obvious spatial differentiation, it was higher at 20 cm in grassland, it was higher at 50 cm and 150 cm in salix community. Plants in grassland mainly used soil water in 0—50 cm, salix mainly used 50—100 cm soil water. (2) The response of soil moisture to precipitation in shallow layer (0—50 cm) was slower than that in bare land, while that in deep layer (50—150 cm) was faster than that in bare land. (3) The depth of precipitation recharge was significantly positively correlated with precipitation, while the response lag time was significantly positively correlated with precipitation duration ($p < 0.05$). [Conclusion] Vegetation type, precipitation duration, precipitation intensity and freeze-thaw process affect the redistribution of water in soil profile and dominate the succession of vegetation type under the change of precipitation pattern.

Keywords: Mu Us sandy land; soil moisture dynamics; rainfall infiltration; different cover types

土壤水分作为大气—植被—土壤连续体的重要载体,是水循环的主要参与者,对生态系统的恢复和持续发展起着关键作用,尤其是在降水量远小于潜在蒸散量的干旱和半干旱地区^[1-2]。自20世纪90年代以来,我国实施了一系列大规模退耕还林还草等生态修复工程,取得了显著的效果^[3],使得干旱半干旱地区的植被覆盖率显著增加。但与此同时也加剧了水资源与植被间的供需矛盾,局部地区由于植被覆盖率的迅速增加导致土壤水分的消耗超出降雨的补给能力,出现土壤水分亏缺和植被群落退化现象^[4-5],严重影响了生态修复工程的稳定性。因此,研究不同植被类型土壤水分动态特征,对于促进植被恢复和生态修复工程可持续性具有重要的实用价值。

目前,很多学者对不同植被土壤水分动态及其对降水响应进行了大量研究,土壤剖面水分分布与植被类型有着密切的关系,王宇祥^[6]、吴远菲^[7]等发现不合理的植被配置会造成土壤干燥化,而林莎等^[8]发现青藏高原东北缘黄土区典型林分—青海云杉和祁连圆柏的配置下,土壤未出现干层、水分过度消耗等现象;另外,不同年生和密度植被、不同坡向等也会造成土壤水分时空的显著差异^[9-10]。降水是干旱和半干旱沙地土壤水分的主要补给源,降水特性影响着土壤水分的补给量和补给深度^[11]。干旱地区降水年内分布不均,且降水强度、降水量和降水历时的年内变异性较大^[12-13],不同时期受土壤含水状态的影响,其响应过程不同。例如历时长、雨量大的降雨事件更有利于水分深层渗漏,同时初始含水量和土壤物理性质也是影响土壤水分对降水响应的主要因素^[14-15]。而植被冠层也会影响降雨再分配,使得水分下渗出现明显的差异性^[16];而在极端干旱的库布齐和乌兰布和沙漠,小的降水为主的格局深根性植物生长受限

制^[17-18]。同时,水热条件的变化也会通过塑造生态格局对土壤水分状态产生影响^[19]。

毛乌素沙地生态环境脆弱,近十几年来,随着植被覆盖率迅速增加,土壤水分的植被承载力引起广泛关注。在已发表文献中,毛乌素地区东南缘典型覆被类型在不同雨量级别影响下的土壤水分变化研究并不多见。因此,以榆林毛乌素沙地的典型覆被沙柳、草地和裸地为研究对象,利用原位试验监测和经典统计学分析相结合的方法,探究3种覆被类型下土壤水分时空变化特征及对不同雨量级别的响应,探讨植被类型对土壤水文的重塑过程,为优化毛乌素沙地植物覆盖类型和提高土壤水分的植被承载力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在陕西省榆林市榆阳区(109°41'E, 38°21'N)国家林业局荒漠生态站内,海拔高度1100 m左右,是典型的干旱半干旱地区和季节性冻土区。每年11月末到翌年3月初处于冻结期,最大冻结深度大于100 cm,2021年主要冻结深度草场地和沙柳地为100 cm、裸地为118 cm。研究区四季分明,近30 a年均降水量为420 mm,降水年内分布不均,大部分出现在6—9月。近30年年平均气温为9.1℃,年内温差超过50℃,潜在蒸发量为2300 mm左右。试验场地下水位埋深在9 m以下,土壤类型为砂土,质地均匀,覆被类型主要以沙柳(*Salix psammiphila*)、草丛〔主要种类为杨柴(*Hedysarum mongolicum*)〕,其次为荒野蒿(*Artemisia campestris* L)、紫苑(*Aster fastigiatus* Fisch)、旋覆花(*Inula japonica* Thunb.)〕为主。

1.2 试验设计

在榆林市国家林业局荒漠生态站试验场内,试验

期为 2020 年 12 月 1 日—2021 年 12 月 1 日,选取多株沙柳组成的灌木丛、相邻区域的草丛和固定沙地(裸地)3 个样地,通过多次测量冠幅尺寸确定沙柳冠层面积约为 7 m²,盖度为 59%;草丛盖度使用垂直投影面积法测定为 67%。在所选 3 个样地,人工挖出 0—150 cm 的剖面,分别在 10,20,50,100,150 cm 深度安装 Hydra Probe II (SDI-12)传感器,数据采集间隔为 10 min。同时使用环刀采取原状土样,在实验室对土壤容重和粒径进行分析(结果见表 1)。同时建立微型气象观测站,收集降水、气温等数据,数据采集间隔为 30 min。根系分布及密度通过地质雷达

(EKKO)测定,从深度统计根系分布,草丛 10 cm 为 31.78%,20 cm 为 27.15%,30 cm 为 14.35%,50 cm 为 5.73%,70 cm 为 4.29%,80 cm 为 0.39%,80 cm 深度以下为 0.04%。沙柳根系深度分布 10 cm 为 13.78%,20 cm 为 8.47%,30 cm 为 6.04%,50 cm 为 15.16%,70 cm 为 12.33%,80 cm 为 12.37%,80 cm 为 5.21%,100 cm 为 0.66%,深度 100 cm 以下为 0.23%。从深度范围统计根系分布,草丛在 0—50 cm 为 90.19%,50—100 cm 为 9.77%,100—150 cm 为 0.04%,沙柳 0—50 cm 为 54.55%;50—100 cm 为 45.22%;100—150 cm 为 0.23%。

表 1 研究区 3 种覆被类型土壤物理性质
Table 1 Soil physical properties of three vegetation types in the study area

深度/cm	草地				沙柳				裸地			
	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)
20	0	0	100	1.52	0.0	1.1	98.9	1.57	0.0	0.2	99.8	1.52
40	0	0	100	1.51	0.0	1.0	99.0	1.51	0.0	0.9	99.1	1.53
60	0	4.1	95.9	1.57	0.0	0.9	99.1	1.52	0.3	21.2	78.5	1.59
80	0	4.6	95.4	1.55	0.0	0.7	99.3	1.53	0.0	15.0	85.0	1.57
100	0	0	100	1.53	0.0	0.6	99.4	1.54	0.0	5.5	94.5	1.54
150	0	0.3	99.7	1.53	0.0	1.4	98.6	1.52	0.0	3.4	96.6	1.53

注:黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)。

1.3 研究方法

(1) 降水事件选取。我国常用的降水分级为小雨(0~9.9 mm)、中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)、暴雨(50~99.9 mm)、大暴雨(100~199.9 mm)和特大暴雨(>200 mm)。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。

(2) 统计分析。对 3 种覆被类型下土壤水分采用 ANOVA 和 LSD 法进行单因素方差分析和多重事后比较($p=0.05$),确定不同覆被类型土壤水分的显著性差异,土壤水分变化影响因素相关性分析应用 Spearman 法确定。

(3) 土壤蓄水量计算。土壤蓄水量计算公式为:

$$W=\sum_{i=1}^n\theta_i\times D_i$$
 (1)

式中: W 为总蓄水量(mm)。 θ_i 为 TDR 监测的土壤体积含水量(%); D_i 为土层厚度(mm); n 为层数。

(4) 冻结期土壤含水量计算。由于土壤冻结时 Hydra Probe II 传感器只能测量未冻水含量,因此在冻结期内定期前往试验场,人工采集冻层内不同深度处的土样,并利用烘干法测量土壤总含水量。由于冻结期受外界环境因素(降雨、蒸发)影响较小,故结合烘干法测得土壤总含水量和冻结期前后土壤含水量,

插值得到冻结期间剖面土壤总含水量分布。

2 结果与分析

2.1 研究期间降水和气温特征

研究区 2020 年 12 月—2021 年 12 月的降水、气温分布见图 1A。根据统计,累积有效降水量和平均温度分别是 12 月至次年 2 月为 1.2 mm,−9.1℃,3—5 月为 91.2 mm,10.7℃,6—8 月为 122.6 mm,23.5℃,9—11 月为 100.8 mm,7.4℃。在研究期间,大气温度在 1 月份最低为 −23℃,随后逐渐升高,在 7 月下旬达到峰值(30℃)后开始下降。在 12 月至次年 2 月,土壤 0—150 cm 经历冻融过程。

研究期总降水量和降水次数分别为 317 mm 和 73 次,其中,小雨占降水总次数的 86.3%,降雨量总计 134 mm,占降水总量的 42.3%,年降水频率为 16.7%,降雨历时 102 h;中雨降水次数为 9 次,占降水总次数的 12.3%,总降雨为 151 mm,占降水总量的 47.6%,年降水频率为 2.5%,降雨历时 68 h;大雨降水 1 次,占降水总次数的 1.4%,降雨量 32 mm,占降水总量的 10.1%,年降水频率为 0.3%,降雨历时 3.5 h。研究期内未出现暴雨及以上级别降水,故选取了 3 次小雨、3 次中雨和 1 次大雨共 7 次降水事件进行分析,降水特征见表 2。

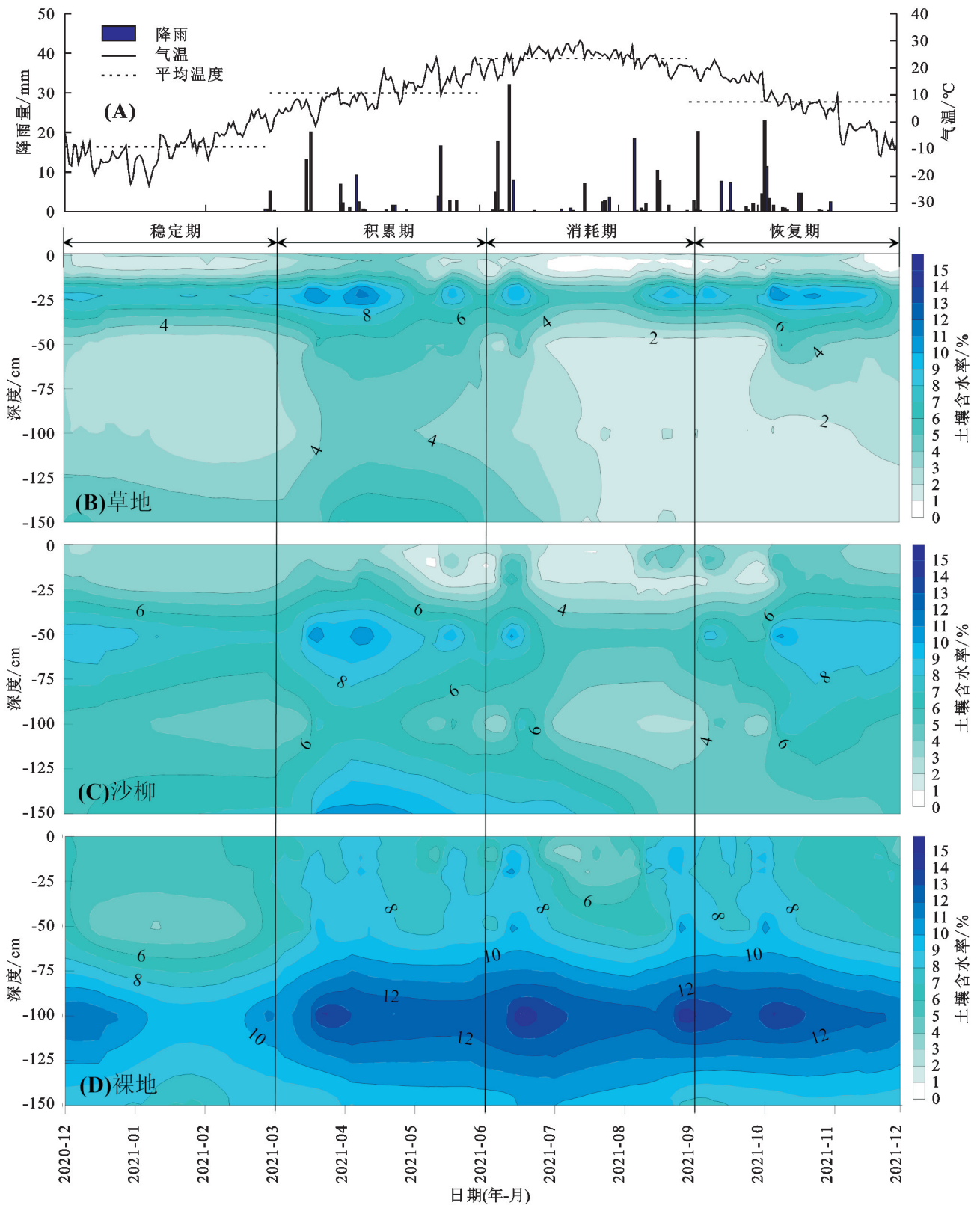


图1 不同覆被类型土壤含水率动态及降水气温变化

Fig 1 Soil moisture content dynamics and precipitation and temperature changes of different cover types

2.2 不同覆被类型的土壤水分变化特征

(1) 3种覆被类型土壤含水率变化特征。① 研究期草丛地土壤含水率动态变化大,高值区主要分布在20 cm。在10 cm水分始终较低,年平均土壤含

水率为2.3%。冻融期次年11月下旬至翌年2月和非冻融期3—11月中旬,20 cm处土壤水分均较高,土壤含水率为7.2%(图1B),显著高于其他层位(图2A)。冻融期水分向冻结锋100 cm附近聚集不明

显。② 研究期沙柳地 0—50 cm 土壤动态含水率变化较剧烈,50—100 cm 和 100—150 cm 土壤含水率变化较小。冻融期和非冻融期高值区均主要分布在 50 cm。其中,10 cm 处土壤水分较低,年平均土壤含水率为 2.4%(图 1C)。沙柳 50 cm 和 150 cm 处土壤含水率显著高于其他层位(图 2A)。冻融期水分向冻结锋 100 cm 附近聚集不明显。③ 裸地研究期 0—50 cm 土壤含水率动态变化剧烈,50—150 cm 土壤含水率变化较小;冻融期和非冻融期高值区均主要分布在 100 cm。其中,在 10 cm 处平均土壤含水率为 6%,土壤水分较低,但显著高于草丛和沙柳地(图 1D),100 cm 平均土壤含水率为 12%,含水率显著高于其他层位(图 2A)。冻融期水分向冻结锋 118 cm 附近聚集明显。

表 2 降水事件特征

Table 2 Characteristics of precipitation events

降水日期	降雨类型	降水量/mm	降水历时/h	平均强度/(mm·h ⁻¹)	最大雨强/(mm·h ⁻¹)
2021-04-18	小雨	3.4	3.5	1.0	2.0
2021-07-17	小雨	7.0	2.5	2.3	7.2
2021-04-08	小雨	8.8	2.0	4.4	6.8
2021-03-17	中雨	13.4	8.0	1.7	4.4
2021-03-19	中雨	20.0	16.0	1.3	3.6
2021-09-05	中雨	19.0	9.0	2.1	16.0
2021-06-14	大雨	32.0	3.5	9.1	20.0

注:小雨(0~9.9 mm)、中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)。

由图 2B 可知,10 cm 处裸地的土壤水分显著高于草地和沙柳,20 cm 处草地和裸地土壤水分差异不显著,但两者显著高于沙柳,50 cm 处沙柳和裸地差异不显著,但显著高于草地,三者 100 cm 和 150 cm 处土壤水分均差异显著,裸地显著高于沙柳地和草地。总体来看,土壤剖面水分的分布受不同覆被类型的影响显著。

(2) 3 种覆被类型土壤蓄水量变化。3 种覆被类型土壤蓄水量变化见图 3。从图 3A—C 来看,在深度范围相同的情况下,平均蓄水量 0—50 cm 在次年 12—2 月为沙柳>裸地>草地,在 3—5 月为裸地>草地>沙柳,6—8 月、9—11 月均为裸地>草地>沙柳,50—100 cm 和 100—150 cm 均为裸地>沙柳>草地。同一时间段,土壤剖面裸地 0—50 cm,50—100 cm 和 100—150 cm 蓄水量均大于草地和沙柳地。草地 0—50 cm 蓄水量只有 3—5 月期间大于沙柳地,其余时段均小于沙柳地;草地 50—100 cm 和 100—150 cm 的蓄水量在 4 个时间段均小于沙柳地。

从图 3D 来看,草地不同时间段的平均蓄水量 0—50 cm 始终大于 50—100 cm。从图 3E 来看,沙柳平均蓄水量除了 6—8 月外,其余时间段 50—100 cm 大于 0—50 cm。从图 3F 来看,裸地不同时间段的平均蓄水量 50—100 cm 始终大于 0—50 cm。次年 12—2 月为冻

融期,草地的冻结水量主要在 0—50 cm 深度,50—100 cm 冻结水量少。沙柳和裸地冻结水量主要在 0—100 cm。冻融期土壤平均蓄水量草地在 0—50 cm,沙柳在 0—100 cm,裸地在 100—150 cm 较高。

2.3 不同覆被类型土壤水分对次降水事件的响应

小雨级别降水中,3.4 mm 降水下土壤水分变化微弱,为无效降水。不同覆被类型土壤水分在次降水量下的动态变化见图 4,滞后响应时间见表 3。

(1) 草地土壤含水率对 7 月 17 日的 7 mm 小雨无响应,对 4 月 8 日 8.8 mm 小雨响应深度达到 20 cm,响应时间 2.2 h。在中雨级别,13.4 mm (3 月 17 日)和 19.5 mm(9 月 5 日)的响应深度都达到 20 cm,但响应时间分别为 6.3 h 和 2 h,而对 3 月 20 日 20 mm 中雨响应深度达到 150 cm(响应时间 124 h),在 10 cm 和 20 cm 深度响应明显。对 6 月 14 日 32 mm 大雨响应深度达到 50 cm (响应时间 4.2 h),在 10 cm,20 cm 处响应明显。

(2) 沙柳地土壤含水率对 7 mm 小雨没有响应,对 8.8 mm 小雨最大响应深度为 20 cm(响应时间 1.5 h),在 10 cm 处响应明显。中雨的最大响应深度不同,13.4 mm 中雨最大响应深度 50 cm(响应时间 6.3 h),50 cm 响应明显。19.5 mm 中雨最大响应深度为 100 cm (响应时间为 27 h),在 10 cm,20 cm 深度响应明显。20 mm 中雨最大响应深度 150 cm(响应时间 112 h),在 10 cm,20 cm,50 cm 深度响应明显。32 mm 大雨最大响应深度 100 cm,(响应时间为 13 h),在 10 cm,20 cm,50 cm 深度响应明显。

(3) 裸地土壤含水率对 7 mm 的小雨在 10 cm 处有响应。对 8.8 mm 小雨的最大响应深度 20 cm (响应滞后时间 1.2 h),在 10 cm 和 20 cm 处响应明显。13.4 mm 中雨最大响应深度 50 cm(响应滞后时间 24 h),在 10 cm、和 20 cm 处响应明显。对 20 mm 中雨的最大响应深度 150 cm(滞后时间 143 h),在 10 cm,20 cm,50 cm 处均有明显响应。对 19.5 mm 中雨的最大响应深度 100 cm(滞后时间 29 h),在 10 cm,20 cm,50 cm 处均有明显响应。对 32 mm 大雨的最大响应深度 100 cm(滞后时间 13 h),在 10 cm,20 cm,50 cm 处均响应明显。同样的降雨,不同覆被类型对降雨的最大响应深度和响应时间均不相同。

2.4 不同覆被类型土壤水分与降水特征的相关性分析

由于不同覆被类型在 10—20 cm 处对 6 次降水均有响应并且响应时间短,选择 10—20 cm 处的土壤水分与降水特征进行相关性分析,分析结果见表 4。草地 10 cm 土壤含水率增幅与降雨量、降雨强度和最大强度显著正相关,滞后时间与降雨历时为显著正相关。20 cm 土壤含水率增幅与降雨量、降雨强度和最

大强度为显著正相关,滞后时间与降雨历时为显著正相关。沙柳地 10 cm 滞后时间与降雨历时为显著正相关。裸地 10 cm 滞后时间与降水强度为显著负相

关,与降雨历时为显著正相关。裸地 20 cm 土壤含水率增幅与降雨量、降雨强度和最大强度为显著正相关,滞后时间与降雨历时为显著正相关。

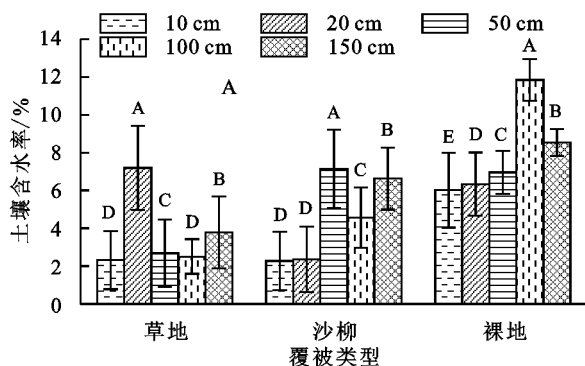


图2 不同植被类型土壤含水率均值变化

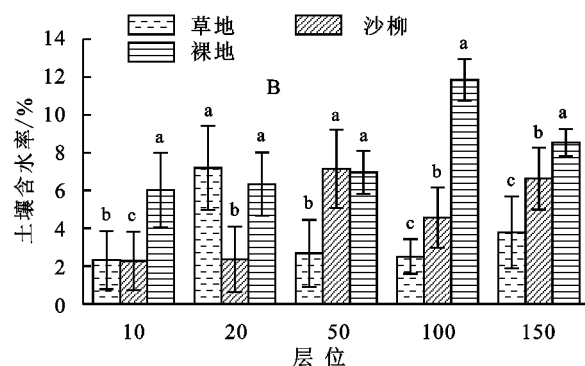


Fig. 2 Mean change of soil moisture content of different vegetation types

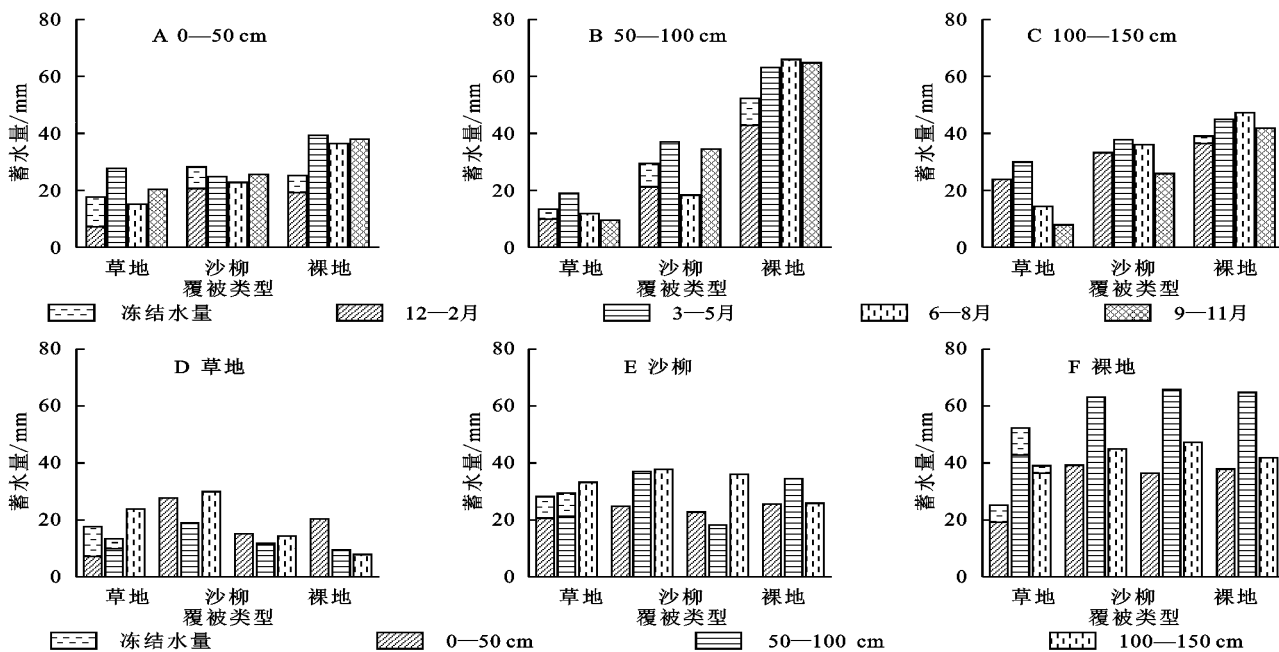


图3 不同覆被类型土壤蓄水量变化

Fig. 3 Changes of soil water storage under different cover types

3 讨论

3.1 不同覆被对土壤水分的影响

(1) 对土壤水分垂直分布的影响。土壤剖面不同深度的平均蓄水量,草地总体呈现出深度 50—100 cm<100—150 cm<0—50 cm,沙柳地为深度 0—50 cm<50—100 cm<100—150 cm,这与根系分布特征有关,草丛的根系主要分布在深度 0—50 cm,其中 20 cm 处根系占比 27.15%,使土壤水分向 20 cm 聚集。沙柳根系主要分布在深度 0—100 cm 范围,50 cm 处根系占比 27.15%,而 50—100 cm 范围沙柳根系占比远大于草地,导致土壤蓄水量沙柳>草地;多余水分受到重力影响下渗至 100—150 cm,该层土壤蓄水量沙柳>草地。虽然裸地土壤水分也呈现出 0—50 cm

<50—100 cm<100—150 cm,但高含水量位置下移,且集中在 100—120 cm 处。与裸地相比,草地和沙柳相应层位的土壤蓄水量均明显低于裸地,主要是降水下渗至根系时,根系吸水拦截降水入渗的水分用于蒸腾,使相应层位水分减少,符合 wang 等^[20]提出的根系限制植被土壤湿润锋运移的观点。若出现干旱胁迫,则根系吸水作用可将部分深层土壤水分提升至浅层^[21]。根系对水分的影响也是动态的,草地在 3—5 月降水较多时,根系区域(0—50 cm)蓄水量明显高于其他区域,高达 27.7 mm,而在 6—8 月植被腾发最剧烈时,根系区域水分快速减少至 15 mm,在 9—11 月份腾发作用减弱,蓄水量回升至 20.4 mm,而沙柳根系在 20~100 cm 内分布较均匀,也有草地类似现象。

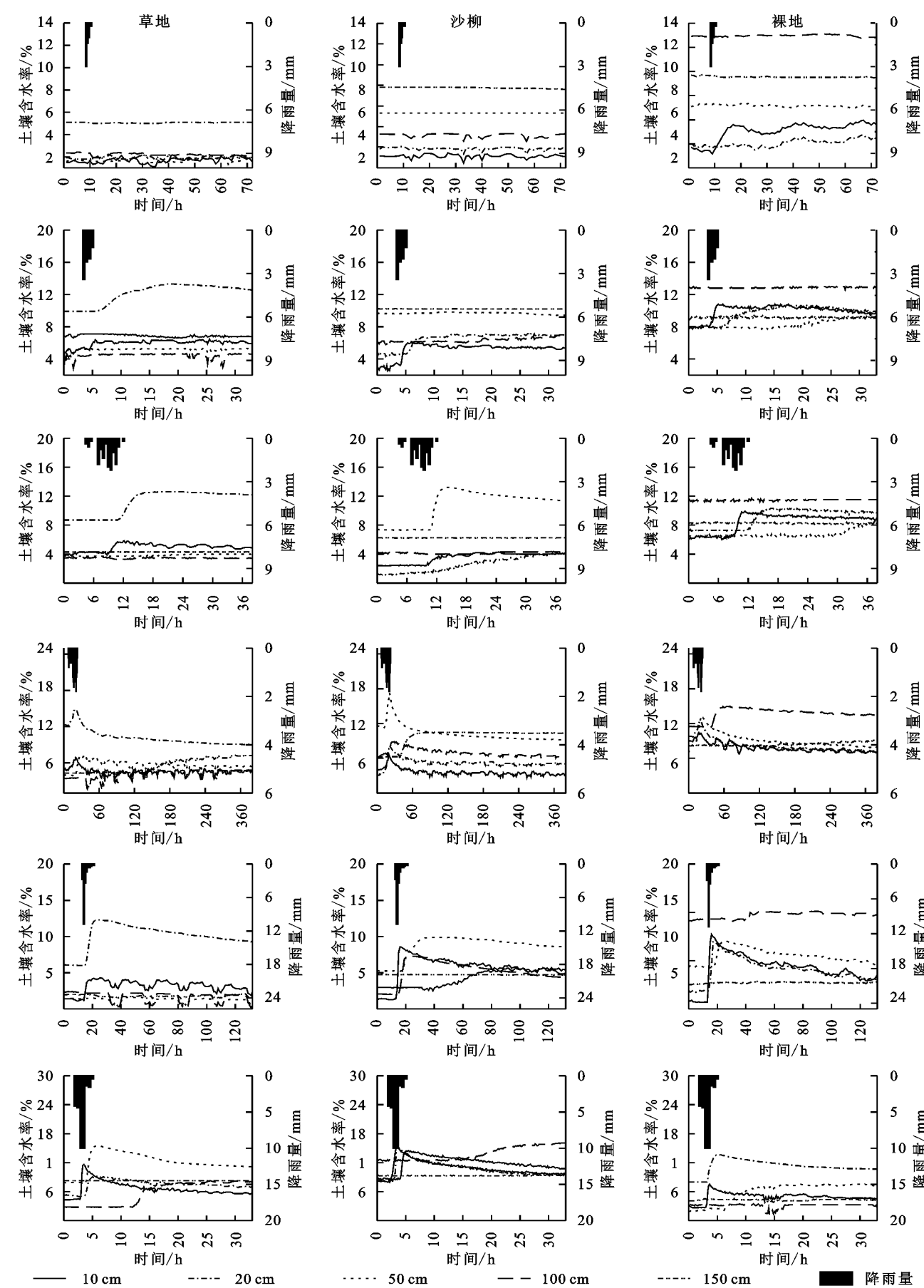


图 4 不同覆被类型下土壤水分对降水的响应

Fig. 4 Response of soil moisture to precipitation under different cover types

表 3 不同覆被类型下各层土壤水分响应滞后时间

Table 3 The lag time of soil moisture response under different cover types

h

降雨量/mm	草地					沙柳					裸地				
	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	150 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	150 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	150 cm
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0	—	—	—	—
8.8	1.0	2.2	—	—	—	0.5	1.5	—	—	—	0.1	1.2	9.7	—	—
13.4	4.2	6.3	—	—	—	5.3	6.0	6.3	—	—	2.2	5.5	24.0	—	—
20.0	1.0	2.8	13.0	27	124	1.0	2.7	4.5	9.5	112	0.1	1.5	2.0	31.0	143.0
19.5	1.7	2.0	—	—	—	1.0	2.0	4.0	27.0	—	0.5	1.0	3.5	29.0	—
32.0	0.8	1.2	4.2	—	—	0.8	1.0	1.8	10.0	—	0.2	0.7	1.5.0	13.0	—

注：“—”表示降水对该层土壤水分没有影响。

表 4 不同覆被类型下 10—20 cm 处水分特征与降雨特征相关性

Table 4 Correlation between soil water characteristics and rainfall characteristics at 10—20 cm under different cover types

层位	土壤水分	降水量	降水强度	降雨历时	最大强度	初始含水量
草地 10 cm	增幅	0.92 *	0.81 *	—0.28	0.78 *	—0.50
	滞后时间	—0.21	—0.43	0.78 *	—0.21	—0.41
草地 20 cm	增幅	0.12	0.19	—0.41	—0.10	0.20
	滞后时间	—0.21	—0.72	0.78 *	—0.23	0.51
沙柳 10 cm	增幅	0.33	0.35	0.05	0.30	—0.43
	滞后时间	—0.18	—0.42	0.8 *	—0.10	—0.35
沙柳 20 cm	增幅	0.58	0.37	—0.03	0.49	—0.51
	滞后时间	—0.35	—0.47	0.55	—0.44	—0.16
裸地 10 cm	增幅	0.51	0.43	—0.20	0.68	—0.35
	滞后时间	—0.21	—0.62 *	0.70 *	—0.26	—0.57
裸地 20 cm	增幅	0.75 *	0.69 *	—0.36	0.69 *	—0.43
	滞后时间	—0.26	—0.47	0.77 *	—0.20	—0.42

(2) 植被类型和水热条件对土壤水分再分布的影响。12 月至翌年 2 月平均气温 -9.1°C (图 1A), 研究区处于冻结期且降水极少, 植物处于休眠季, 耗水较少, 土壤腾发作用微弱, 土壤水分稳定。3—5 月平均气温 10.7°C , 气温升高, 土壤解冻, 出现多次降水, 而沙柳和草地刚进入返青期, 植物冠层截留和根系消耗较少, 降水可补给至草地、沙柳和裸地的深层土壤, 因此三者土壤剖面都保持较高的土壤含水量, 对保持土壤水分年际动态平衡极为重要。6—8 月气温逐渐升高并达到峰值, 植物正处于耗水最多的生长期, 土壤腾发剧烈, 降水补给小于土壤水分消耗, 水分降低。9—11 月气温逐渐降低, 植物耗水降低, 加之降水量和降水强度较大, 降水能够补给较深土壤中, 且土壤剖面各层含水量均有回升。

3.2 不同覆被类型土壤水分对降水的响应

研究区地下水位在 9 m 以下, 对植被根系区域水分的补给极其有限, 所以降水是土壤水分的主要补给来源。

(1) 对降水量的响应。同级别降水, 浅层土壤水分(0—50 cm)裸地对各降水的响应速度显著快于沙柳和草地, 主要是草地和沙柳的植被冠层截留、地表枯落物和生物土壤结皮降低土壤入渗率等的影响, 提高地表持水性^[22]。深层土壤水分(50—150 cm)裸地响应速度慢于草地和沙柳, 这可能是由于沙柳根系较

深、出现根际优先流^[21]; 草地根系分布较浅且细根多^[23], 有利于降水从(0—50 cm)入渗到(50—150 cm)。另一方面, 土壤质地影响着水分下渗, 土壤剖面 60 cm 和 80 cm 处粉粒含量裸地分别占 21.2% 和 15%, 草地为 4.1% 和 4.6%, 沙柳为 0.9% 和 0.7%(表 1)。深层土壤水分(50—100 cm)对中雨 20 mm 有响应, 响应时间沙柳<草地<裸地, 补给至深层土壤的水分是干旱和半干旱地区水循环的重要组成部分^[24], 可以缓解极端干旱季节固沙植被对水分的需求, 维持生命活动, 帮助植被度过极端干旱时期, 这也有助于固沙植被的稳定性和可持续性。

(2) 对降水历时和降水强度的响应。受降水历时的影响, 3 种覆被类型土壤水分对 20 mm 中雨和 32 mm 大雨均有响应, 而前者无论入渗补给深度和补给量要大于后者, 主要因为 20 mm 中雨的降水历时长, 利于土壤水分下渗。降水 20 mm 时, 草地和沙柳各层土壤水分响应滞后时间大于 32 mm 降水, 主要是后者降水强度大, 能够更快地达到稳定土壤入渗率。另外, 32 mm 大雨属于短时强降水, 受前期干旱造成土壤初始含水量低, 以及降水后的快速蒸腾的共同影响, 向深部补给量较小, 这与 Liu^[25]和李新乐^[18]等的研究结论相符。同时, 由于大部分降雨事件前期雨量较少, 随着降雨量累积土壤水分才出现响应, 所以草地、沙柳和裸地 10 cm 和 20 cm 处土壤水分响应

滞后时间与降雨历时表现出显著正相关。

(3) 对降水格局的响应。本研究区小雨级别降水事件占全部降水事件次数的85.9%,降水量却只占总降水量的42.1%;中雨级别的降水事件占全部降水事件的12.7%,降水量占总降水量的47.8%;大雨级别的降水事件占全部降水事件的1.4%,降水量占总降水量的10.1%。大量研究表明小级别降水补给到浅层土壤水分,可供给根系较浅的植被利用,较大级别降水能够入渗到深层土壤,利于深根植物吸收利用^[17,22]。贺军奇^[26]和方欣^[27]等提出未来毛乌素沙地的年降水变化呈现增加趋势,并主要表现为大降水事件的增加,这将有助于对深层土壤水分的改善和深根系植被的生长,会对植被演替产生重大影响。

4 结论

(1) 在年际尺度,土壤水分表现出稳定期(12月至次年2月)、积累期(3—5月)、消耗期(6—8月)和恢复期(9—11月),降水补给土壤水分主要发生在积累期和恢复期。在剖面上,土壤水分草地在20 cm附近较高,沙柳在50 cm和150 cm处较高,裸地则是在100 cm处较高。由于草地根系和土壤平均蓄水量均是0—50 cm大于50—100 cm,因此,研究区草地主要利用0—50 cm深度的土壤水分。沙柳根系主要分布在20—100 cm,蓄水量最大位于50—100 cm,因此,沙柳主要利用50—100 cm土壤水分。

(2) 浅层土壤水分在0—50 cm深度,裸地对各降水的响应速度显著快于沙柳地和草地。深层土壤水分50—150 cm深度裸地响应速度慢于草地和沙柳。降水补给深度与降水量为显著正相关,而响应滞后时间与降水历时为显著正相关($p < 0.05$),冻融过程、植被类型和降水特征影响土壤剖面水分再分配。土壤水分对降水量大、降水历时长降雨响应较好,该类型降水有助于干旱期固沙植被的生长。

(3) 冻融期和非冻融期,覆被类型都影响着土壤水分的动态变化和剖面垂直分布,从而影响着植被类型在降水格局变化下的演替。

参考文献:

- [1] Gao X, Zhao X, Si B C, et al. Catchment-scale variability of absolute versus temporal anomaly soil moisture: Time-invariant part not always plays the leading role[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1669-1678.
- [2] Su B, Shang G Z. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(3): 290-299.
- [3] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [4] 高佳,王文科,赵明,等.毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 34-42.
Gao J, Wang W K, Zhao M, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in nonfreezing period under bare land and vegetation cover in Mu Us desert[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 34-42.
- [5] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [6] 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.
Wang Y X, Liu T X, Duan L M, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture and environmental impact factors in different types of dunes in Horqin[J]. *Journal of Soil Land Water Conservation*, 2020, 34(6): 125-134.
- [7] 吴远菲,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区典型灌木和荒草地土壤含水量变化对降雨的响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 121-126.
Wu Y F, Xiao P Q, Hao S L, et al. Response of soil moisture of typical shrubland and waste grassland to precipitation in the Loess HillyGully Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 121-126.
- [8] 林莎,王莉,李远航,等.青藏高原东北缘黄土区典型立地人工林分土壤水分特性研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6610-6621.
Lin S, Wang L, Li Y H, et al. Soil moisture characteristics of typical standing artificial forests in loess area of the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6610-6621.
- [9] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 163-169.
Kong L X, Bi H X, Zhou Q Z, et al. Dynamics of soil moisture in different stand sites of Robinia pseudoacacia forestlands in loess region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil Land Water Conservation*, 2018, 32(5): 163-169.
- [10] 宋乃平,杨明秀,王磊,等.荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2618-2624.
Song N P, Yang M X, Wang L, et al. Monthly variation in soil moisture under Caragana intermedia stands grown in desert steppe[J]. *Chinese Journal Ecology*, 2014, 33(10): 2618-2624.
- [11] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 347-358.

- Ma M M, Lin Q, Xu S H. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2):347-358.
- [12] Zhu P, Zhang G, Wang H, et al. Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau [J]. *Agr. Water Manage.*, 2021, 256:107086.
- [13] 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.
- [14] 樊婷, 张存厚, 张德广, 等. 内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):72-77, 84.
- Fan T, Zhang C H, Zhang D G, et al. Response of soil moisture of desert steppes to precipitation patterns in Damao Banner, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1):72-77, 84.
- [15] 陈娟, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4):18-23.
- Chen J, Chen L, Song N P, et al. Soil Infiltration characteristics of different soils types in desert steppe [J]. *Journal of Soil Land Water Conservation*, 2018, 32(4):18-23.
- [16] 王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3):755-760.
- Wang Z N, Wang X P, Liu B. Rainfall and soil moisture redistribution induced by xerophytic shrubs in an arid desert ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3):755-760.
- [17] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5):1571-1578.
- Wang B, Duan Y X, Wang W F, et al. Response of shallow soil moisture of *Artemisia ordosica* Shrub community to different rainfall patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5):1571-1578.
- [18] 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.
- [19] 宋一凡, 卢亚静, 郭中小, 等. 荒漠草原脉动性降水格局及其时空变化特征: 以达尔罕茂明安联合旗为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(11):3952-3966.
- Song Y F, Lu Y J, Guo Z X, et al. Precipitation pulse patterns and their spatiotemporal variation in desert steppes: a case study in the Darhan Muminggan Joint Banner[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11):3952-3966.
- [20] Wang X P, Cui Y, Pan Y X, et al. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2):134-143.
- [21] 刘深思, 徐贵青, 李彦, 等. 5 种沙地灌木对地下水埋深变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(2):615-625.
- Liu S S, Xu G P, Li Y, et al. Difference and consistency of responses of five sandy shrubs to changes in groundwater level in the Hailiutu River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2):615-625.
- [22] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同植被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6):198-206.
- Chen J, Song N P, Chen L, et al. Soil moisture dynamic and its response to precipitation in different cover types of desert steppe[J]. *Journal of Soil Land Water Conservation*, 2021, 35(6):198-206.
- [23] 李柳, 郑肖然, 李小雁, 等. 小叶锦鸡儿灌丛对土壤水分下渗及优势流的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):55-59, 132.
- Li L, Zheng X R, Li X Y, et al. Effects of *Caragana microphylla* shrub on soil water infiltration and preferential flow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):55-59, 132.
- [24] 陈 Y, 何 J, 何 Y, 等. 季节性水文地质特征在 *Salix psammophila* 及其对土壤水分和气象因素在沙漠地区[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108626.
- [25] Liu X, Gao W, Sun S, et al. Responses of soil water dynamic processes and groundwater recharge to irrigation intensity and antecedent moisture in the vadose zone[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(5):849-863.
- [26] 贺军奇, 魏燕, 高万德, 等. 毛乌素沙地东南缘植被 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5):1523-1533.
- He J Q, Wei Y, Gao W D, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors in the southeastern margin of Mu Us Sandy Land[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5):1523-1533.
- [27] 方欣, 刘小楝, 岳大鹏. 毛乌素沙地 1960—2018 年气候变化特征及影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2):163-169.
- Fang X, Liu X K, Yue D P. Analysis of climate change characteristics and influencing factors in Maowusu Sandy Land from 1960 to 2018[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2022, 29(2):163-169.