

降雨对柠条锦鸡儿固沙林土壤水分动态变化特征的影响

贺 帅¹, 王晓江², 洪光宇^{2,3}, 张成福¹, 李卓凡², 李梓豪², 高孝威²

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010010; 2.内蒙古自治区林业科学研究院,
呼和浩特 010010; 3.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010010)

摘 要:为探讨半干旱区柠条锦鸡儿林沙丘土壤水分对降雨的响应,采用 WatchDog 土壤水分传感器、HOBO U30 小型自动气象站同步监测毛乌素沙地人工柠条锦鸡儿林 0—110 cm 层土壤含水量与 2019 年降水量,分析了沙丘土壤含水量动态变化与降雨入渗特征。结果表明:2019 年 5 月 1 日—9 月 15 日期间,柠条锦鸡儿林沙丘不同土层水分含量变化受降雨量、累计降雨以及降雨入渗效应等综合因素的影响。其中 0—50 cm 层土壤含水量对降雨的响应较敏感,累计降雨 46 mm 可对 110 cm 层土壤水分进行补给;降雨量 < 5 mm 时,湿润深度 < 5 cm,降雨量 10 mm 左右时,湿润深度 < 30 cm,降雨量 20 mm 左右时湿润深度 30—50 cm,降雨量 30 mm 时,湿润深度 > 50 cm,降雨量 50 mm 时湿润深度可达 110 cm 土层,说明降雨对柠条锦鸡儿林沙丘水分状况有补给作用,但是对 90 cm 以下土层水分状况的补给能力有限;当降雨量基本相等时,降雨强度与土壤初始含水量对入渗深度及进程有明显影响,即降雨强度越大,土壤初始含水量越高,降雨入渗深度越深,入渗历时越短。

关键词:柠条锦鸡儿; 土壤含水量; 降雨入渗; 毛乌素沙地

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0106-07

Effect of Rainfall on Characteristics of Soil Water Dynamic in Caragana Microphylla Sand Fixation Forest

HE Shuai¹, WANG Xiaojiang², HONG Guangyu^{2,3}, ZHANG Chengfu¹,
LI Zhuofan², LI Zihao², GAO Xiaowei²

(1.College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010,
China; 2.Institute of Forestry Science of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China;

3.College of Grassland and Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China)

Abstract:In order to explore the response of soil moisture in sand dunes of *Caragana korshinskii* forest to rainfall in semi-arid area, the monitoring of soil moisture in 0—110 cm layer and rainfall in 2019 in Artificial *Caragana korshinskii* forest in Mu Us sandy land was carried out simultaneously by using watchdog soil moisture sensor and HOBO small automatic weather station, and the dynamic change of soil moisture and rainfall infiltration characteristics of sand dunes were analyzed. The results show that from May 1 to September 15, 2019, the change of water content in different layers of sand dunes in Caragana forest was affected by rainfall, cumulative rainfall and rainfall infiltration effect; The soil moisture content in 0—50 cm layer was more sensitive to rainfall; the accumulated rainfall of 46 mm could supply the soil moisture of 110 cm layer; when the rainfall is less than 5 mm, the wetting depth is less than 5 cm; when the rainfall is about 10 mm, the wetting depth is less than 30 cm; when the rainfall is about 20 mm, the wetting depth is 30—50 cm; when the rainfall is 30 mm, the wetting depth is more than 50 cm; when the rainfall is 46 mm, the wetting depth can reach 110 cm soil layer, which indicates that rainfall is related to lime; the water status of sand dunes in tiaojianerlin has a supply function, but the supply ability to the soil moisture status below 90 cm is

收稿日期:2019-11-27

修回日期:2019-12-04

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(201601061);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2019MS03036);2018 年内蒙古自治区研究生科研创新项目(B2018111934Z);内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD007)

第一作者:贺帅(1995—),男,内蒙古乌海人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:780496927@qq.com

通信作者:张成福(1966—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail:2651534893@qq.com

limited; when the rainfall is basically the same, the rainfall intensity and the initial soil moisture content have a significant impact on the infiltration depth and process, that is, the greater the rainfall intensity is, the higher the initial soil moisture content is, the deeper the rainfall infiltration depth is, and the shorter the infiltration duration is.

Keywords: *Caragana korshinskii* Kom.; soil moisture content; rainfall infiltration; Mu Us Desert

在干旱半干旱沙漠地区,由于降水稀缺,蒸发剧烈,使得水分成为沙地生态系统中植被建设和发展的最重要因子^[1-3]。而降水又是沙地土壤水分的最主要补给来源^[1],建立固沙植被后,土壤水分对降雨的响应已经成为改善沙地生态环境和提高人工造林地稳定性研究中急需解决的关键科学问题。柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)是毛乌素沙地植被群落中占优势的多年生灌木,其根系发达、固沙能力强、耐风蚀、抗沙埋。因此,其在水土保持、防风固沙和生态恢复方面具有重要作用^[4]。目前已有一些关于柠条锦鸡儿的研究主要集中在种子萌发对于干旱胁迫和土壤水分的关系^[5-8]、密度及根系分布与土壤水分的关系^[9-10]、蒸腾速率与水分的关系^[11]等方面,而有关柠条锦鸡儿林土壤水分对降雨的动态响应研究则较少。鉴此,本文以毛乌素沙地柠条锦鸡儿固沙林为研究对象,采用 WatchDog 土壤水分自动监测系统与 HOBO U30 小型自动气象站连续监测柠条锦鸡儿林沙丘 0—110 cm 层土壤水分含量与大气降水。分析柠条锦鸡儿林沙丘土壤水分对降雨的响应特征,以期对沙区水资源评估、植被稳定性评价提供参考,进而对合理有效利用有限水资源、植被恢复与重建、防治土地荒漠化具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

本试验研究地位于内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗毛乌素沙地生态系统国家定位监测站,及乌兰陶乐盖治沙站林场内(109°15′34″E,38°51′56″N)。该地区为典型温带大陆性半干旱气候,自然条件相对优越。年平均风速 3.6 m/s,平均日照时数 2 900 h,平均相对湿度 52%,平均气温 6.0~8.5℃,无霜期 127~136 d。年平均降水 300~400 mm,平均潜在蒸发量 2 563 mm,为降水的 7.2 倍,降水具有空间分布不平衡、季节分布不均匀、年际变化大等特点。土壤以风沙土为主,粒径较粗,物理性黏粒(<0.01 mm)和有机质含量很少,结构松散,质地均一,土壤持水率弱,渗透力强。植被以草甸植被与沙生植被等隐域性植被为主体,多年生草本占绝对优势,半灌木和小灌木分布较广,乔木种类较少。主要固沙植被有柠条

(*Caragana korshinskii* Kom.)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、杨柴(*Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*)等。

1.2 研究方法

2018 年 4 月采用定点监测的方法,选择研究区 17 a 生柠条锦鸡儿(*Caragana Korshinskii* Kom)固沙林与裸露流动沙地进行监测。柠条锦鸡儿造林地造林规格为带距 6 m,行距 3 m,于 2002 年完成造林。本试验选则造林地沙丘高度 3~4 m 的固定沙作为试验样地,其中柠条锦鸡儿固沙林地有少量草本覆盖,但无土壤结皮,不会产生地表径流,降雨是试验区沙地土壤水分的主要来源。2018 年 4 月 14 日为避免植被覆盖对试验的影响,在柠条锦鸡儿固沙林中部林带间无植被覆盖区挖取入深 120 cm 的土壤剖面,同时按照 10 cm,30 cm,50 cm,70 cm,90 cm,110 cm 的土壤分层,将 WatchDog 土壤水分自动监测系统的传感器以水平状态,且沿垂直方向从上到下依次插入相应土层测定土壤体积含水量,且每一土层仅设置一个水分传感器探头,安装完成后原状土回填土壤剖面,浇水踏实。水分传感器为 SM100 型,传感器分辨率 0.001 m³/m³(0.1% VWC),土壤水分单位为体积含水量。WatchDog 土壤水分自动监测系统为全自动监测,本试验将数据采集时间设定为每 1 h 自动记录一次数据,一天 24 组数据。研究区同步安装有 HOBO U30 小型自动气象站用来对降雨量进行自动监测,数据采集时间设定为每 0.5 h 记录一次数据。

本文选择柠条锦鸡儿生长季 2019 年 5 月 1 日至 2019 年 9 月 15 日的数据进行分析柠条锦鸡儿固沙林地土壤水分对降雨动态的响应。由于 70 cm 层水分传感器出现故障,导致此层土壤含水量数据丢失,故本文未对 70 cm 层土壤水分含量动态进行分析。

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 日降雨对柠条锦鸡儿林沙丘土壤含水量的影响

监测期间,研究区 2019 年 5 月 1 日—9 月 15 日共发生 33 次降雨事件,总降雨 245.86 mm,降雨量≤5 mm

的降雨事件 18 次,共降雨 17.14 mm,占总降雨的 6.9%;降雨量介于 5~10 mm 的降雨事件 5 次,共降雨 42.42 mm,占总降雨的 17.3%;降雨量 10~20 mm 的降雨事件 7 次,共降雨 105.26 mm,占总降雨的 42.81%;降雨量 20~30 mm 的降雨事件 2 次,共降雨 49.89 mm,占总降雨的 20.3%;降雨量 30~40 mm 的降雨事件 1 次,共降雨 31.17 mm,占总降雨的 12.3%。可见监测期内日降雨大都是 0~20 mm 范围内,累计降雨 165.09 mm,占总降雨的 67.1%。结合柠条锦鸡儿固沙林水分含量动态变化规律来看(图 1),10 cm 层土壤含水量在整个监测期

内波动最为频繁,每次波动达到峰值时的时间都与降雨时间相对应,说明 10 cm 层土壤水分受降水影响剧烈,同时也是受蒸发影响最明显的一层。监测期 54 d 以前,共发生 9 次降雨事件,总降雨 20.65 mm(最大一次降雨量为 9.60 mm),仅 10 cm 层土壤水分含量出现了峰值(4 次),达到峰值时的土壤含水量分别为 2.05%,0.84%,2.89%和 3.5%,且最大值出现在 9.6 mm 降雨事件后。这段时间内,30,50,90 cm 层土壤水分含量持续下降,110 cm 层土壤水分含量基本维持在 3.6%上下。

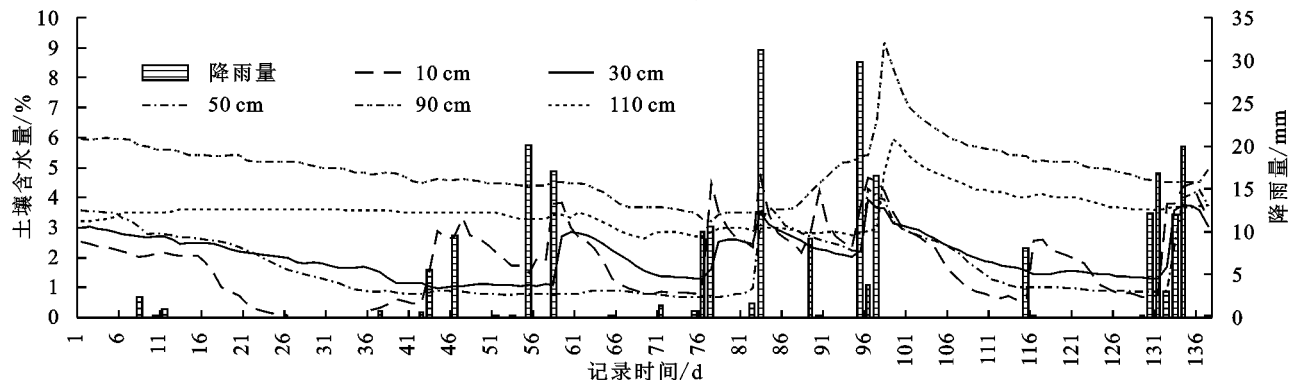


图 1 柠条锦鸡儿固沙林沙丘各层土壤含水量动态变化

在监测期第 55~137 d 内发生降雨 24 次,共降雨 225.21 mm,110 cm 层以上土壤水分含量均发生波动并有峰值出现,10 cm 层峰值出现次数最多(10 次);30 cm 层出现 7 次;50 cm 层出现 5 次;90 cm 层出现 3 次;110 cm 层出现 5 次。其中 30 cm 层土壤水分含量波动出现第一次明显峰值在第 75~77 d,累计降雨 21.41 mm 后;50 cm 层土壤水分含量波动出现第一次明显峰值在第 82~83 d 累计降雨 32.79 mm 后;90 cm 层土壤含水量前两次与 110 cm 层前 4 次波动出现峰值时的土壤水分含量变幅均 $<1\%$,但在第 95~97 d 累计降雨 50.27 mm 后,90,110 cm 层土壤水分含量波动出现明显峰值,且变化差异极显著。从时间角度来看,10,30,50 cm 层土壤水分含量达到峰值时的时间基本与降水发生时的时间对应;90,110 cm 层土壤水分含量达到峰值时的时间则相对要滞后于降雨发生时的时间,且其峰值的出现需要多次累计降雨,通过多次累计降雨共同作用产生加和效应,水分湿润峰可达 90,110 cm 层土壤。以上结果表明 0—50 cm 层土壤水分含量对降雨的响应较敏感,90,110 cm 层土壤水分动态对日降雨响应相对滞后,且在低强度降雨下,水分入渗到深层土壤需要较长时间。在 5—7 月,由于基本无降雨事件发生,土壤水分的补给量远小于消耗量,导致 30,50,90 cm 层土壤水分处于亏缺状态。根据降雨分布发现,90 cm

层以下土壤水分含量波动出现明显峰值与监测期第 95~97 d 累计 50.27 mm 的降雨密切相关,换句话说就是日降雨量或者是累计降雨量达到 50 mm 时,降雨才可补给到柠条锦鸡儿固沙林 90 cm 及以下土层土壤水分。

为进一步说明降雨对毛乌素沙地柠条锦鸡儿固沙林土壤含水量的影响,采用旬统计平均数据对不同土层土壤含水量进行分析(表 1)。从表中可以看出随着土层深度的变化,土壤含水量呈现出不同的变化规律,10,30,50 cm 层土壤含水量分别存在 3 个上升期,而 90,110 cm 层各存在一个上升期。其中 10 cm 层土壤含水量在 5 月下旬—6 月下旬、7 月上旬—8 月上旬、8 月中旬—9 月上旬处于上升期;30 cm 层土壤含水量在 6 月中旬—7 月上旬、7 月中旬—8 月上旬、8 月下旬—9 月上旬处于上升期;50 cm 层土壤含水量在 6 月下旬—7 月上旬、7 月中旬—8 月上旬、8 月下旬—9 月上旬处于上升期;90 cm 层土壤含水量在 7 月中旬—8 月上旬处于上升期;110 cm 层土壤含水量在 7 月中旬—8 月中旬处于上升期。说明不同土层土壤含水量对累计降雨量以及累计降雨入渗效应响应的敏感程度不同,90 cm 层及以下土层土壤含水量可对累计降雨入渗做出响应,但存在一定的滞后性,尤其是 110 cm 层土壤含水量增加时的滞后效应更加明显。

表 1 柠条锦鸡儿林沙丘土壤含水量旬变化特征

统计时间	土层深度/cm					累计 降雨/mm
	10	30	50	90	110	
5 月上旬	2.25±0.17CDa	2.84±0.13 Fb	3.28±0.31 Ec	5.87±0.14 Gd	3.38±0.13BCc	2.62
5 月中旬	1.63±0.57Ca	2.46±0.14DEFb	2.60±0.13Cb	5.45±0.08 FGd	3.59±0.03CDc	1.02
5 月下旬	0.22±0.14Aa	1.95±0.15BCc	1.67±0.34Bb	5.14±0.09DEFc	3.60±0.00CDd	0.00
6 月上旬	0.44±0.13ABa	1.46±0.24ABc	0.92±0.11Ab	4.81±0.12CDEe	3.07±0.04CDd	0.00
6 月中旬	2.34±0.83Cb	1.07±0.06Aa	0.84±0.42Aa	4.56±0.06Cd	3.50±0.00Cc	7.01
6 月下旬	2.41±0.87CDc	1.60±0.82ABb	0.79±0.19Aa	4.45±0.04Ce	3.36±0.08BCd	10.00
7 月上旬	1.34±0.65BCb	2.01±0.49BCc	0.85±0.57Aa	3.92±0.29Be	2.97±0.27ABd	37.28
7 月中旬	2.06±1.35Cb	1.85±0.62BCb	0.72±0.44Aa	3.47±0.13Ad	2.87±0.12Ac	12.19
7 月下旬	3.06±0.82DEa	2.64±0.42 EFa	2.75±0.69CDa	3.98±0.53Bb	2.90±0.07Aa	43.41
8 月上旬	3.40±0.85 Ea	2.97±0.68 Fa	3.07±0.76DEa	6.65±1.39 Gb	4.12±1.37 Ea	59.67
8 月中旬	1.34±0.69BCa	2.20±0.35CDB	1.95±0.54Bb	5.90±0.32Bd	4.50±0.28 Fc	0.00
8 月下旬	1.71±0.75Cb	1.53±0.88ABb	0.99±0.04Aa	5.23±0.13 EFd	4.01±0.07DEc	8.23
9 月上旬	1.70±0.75BCa	1.62±0.70ABa	1.03±0.47Aa	4.71±0.19CDc	3.66±0.07CDb	32.18

注:同列不同小写字母为差异显著($p<0.05$),同行不同大写字母为差异显著($p<0.05$)。

2.2 降雨条件下柠条锦鸡儿固沙林沙丘土壤含水量变化的时间进程

固定沙丘土壤水分入渗进程受降雨格局、植被覆盖与土壤初始含水量的综合影响显著^[12-13],严正升^[14]研究发现降水在人工柠条林具有滞后效应,柠条林密度越大滞后效应越明显,降水入渗深度、入渗量因林分密度不同存在差异。冯伟等^[15]研究表明 0—200 cm 深度土壤体积含水量较低时 53.8 mm(历时 71 h)降雨开始后 310 h 土壤湿润峰达 200 cm,土壤体积含水量较高时 88.6 mm(历时 62 h)降雨开始后 70 h 湿润锋到达 200 cm。为更加直观的得出降雨对柠条锦鸡儿固沙林地土壤含水量动态变化的影响过程,选择两次降雨事件,分析每个小时柠条锦鸡儿林地土壤含水量变化的时间进程。

从图 2 中可以看出,当累计日降雨 3.4 mm(9 月 9 日 5—8 时),10 cm 层土壤含水量从 2.1%增加到

第一次峰值 4.3%历时 3 h;当累计日降雨 14.94 mm(9 月 9 日 5—17 时),10 cm 层土壤含水量从 4%增加到第二次峰值 5.5%历时 4 h。当累计降雨 16.33 mm(历时 18 h)时,30 cm 层土壤含水量从 1.3%增加大最大值 3.6%历时 18 h,50 cm 层土壤含水量从 0.9%增加到最大值 3.7%历时 37 h。在 16.33 mm(历时 18 h)降雨水平下,90,110 cm 层土壤含水量未发生变化,说明 16.36 mm(历时 19 h)的单场降雨对 90 cm 以下土层土壤含水量无影响。以上结果表明 3.4 mm(历时 3 h)的降雨能使 10 cm 层土壤达到湿润峰,16.33 mm(历时 18 h)的降雨可使 30,50 cm 层土壤分别在第 18 小时和 37 h 时达到湿润峰。而 14.9 mm(历时 12 h)的累计降雨可使 10 cm 层土壤含水量达到波动峰,这里的波动峰值是 16.33 mm(历时 18 h)的降雨下能使 10 cm 层土壤所能达到的最大含水量。

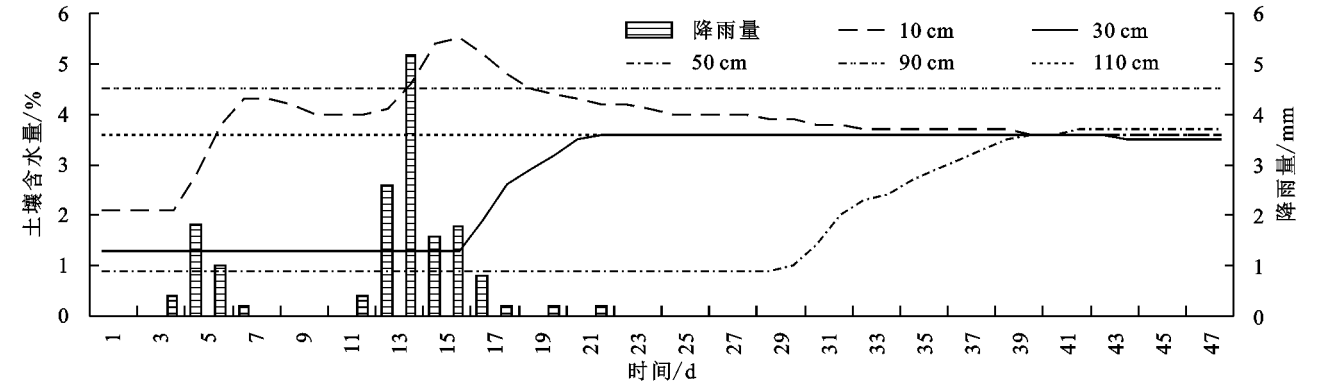


图 2 日降雨 16.33 mm 对柠条锦鸡儿林沙丘土壤含水量的动态变化

土壤达到饱和含水量时的入渗为饱和条件下的较大的降雨都会产生饱和入渗,当降雨强度低于饱和水分入渗,但是由于受到降雨强度的影响,不是每次入渗率时,土壤水分入渗还是处于非饱和条件下的入

渗^[15]。试验监测期内的最大含水量最多维持 2 h 内保持不变,而且仅在 10 cm 和 30 cm 层土壤内,因此这里的饱和含水量只是瞬时达到饱和。此外降雨事件前,30,50 cm 层土壤含水量很低,原因是 8 月 25 日—9 月 9 日前一直无有效降雨过程,深层土壤缺乏水分的补给,这种现象同样说明土壤含水量处于非饱和状态时,水分入渗深度有限。

从图 3 中可以看出,第一阶段降雨时土壤初始含水量处于较低水平,各层土壤初始含水量分别为 2.1%,2.1%,2.2%,5.4%,2.8%。此时湿润峰达到 10,30,50 cm 层土壤所需降雨量与时间分别为 25.02 mm(13 h),28.83 mm(16 h),29.85 mm(19 h),在 29.85 mm(历时 18 h)的降雨水平下未能使 90 cm 层

土壤达到湿润峰,且该场次降雨不能影响 110 cm 层土壤水分含量;第二阶段降雨时土壤初始含水量处于较高水平,各层土壤初始含水量分别为 3.7%,3.2%,3.7%,6.9%,2.8%。此时湿润峰达 10,30,50,90 cm 层土壤所需降雨量与时间分别为 13.61 mm(1 h),14.02 mm(2 h),16.61 mm(5 h),16.61 mm(17 h)。在单场累计 46.46 mm(历时 61 h)降雨水平下能使 110 cm 层土壤含水量达到湿润峰,但是该场次降雨未能使 110 cm 层土壤含水量达到波动峰值。综上所述,累计 46.46 mm(历时 61 h)的降雨通过入渗和再分配后可使 90 cm 以上土层土壤含水量达到波动峰值,且土壤初始含水量对降雨入渗深度和进程有显著影响,初始含水量较高时,降雨入渗快,历时短。

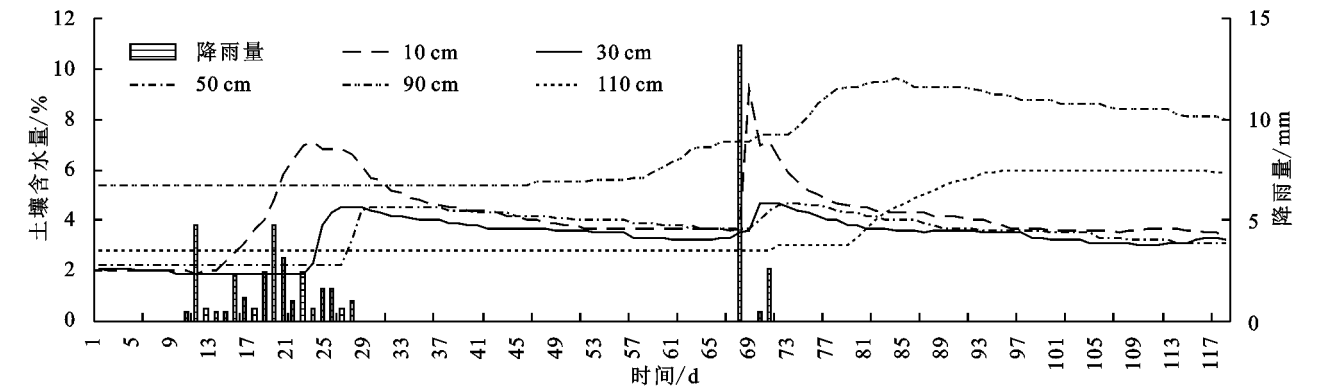


图 3 连续日降雨 46.46 mm 对柠条锦鸡儿林沙丘土壤含水量的动态变化

2.3 柠条锦鸡儿固沙林沙丘中的降雨入渗特征

次降水特性(降水强度、降水历时、降水量)与土壤水分初始状况决定灌丛沙丘土壤入渗过程。王新平等^[16]研究发现沙地次降水过程具有明显的间歇性,间歇性降水与瞬时土壤表面高蒸发相互影响,导致雨季(生长季)沙丘土壤浅层干湿交替发生频繁,由于局部土壤水分势能梯度复杂,自然降水条件下的土壤水分入渗过程相对复杂。因此本研究分析了自然日降雨条件

下柠条锦鸡儿林沙丘的降雨入渗特征。

从表 2 中可以看出降雨入渗深度和降雨量、降雨强度、土壤初始含水量密切相关。入渗湿润深度随着降雨量、降雨强度的增加而增加(7 月 28 日除外),降雨量小于 5 mm,湿润深度小于 10 cm 土层,降雨量小于 10 mm,湿润深度小于 30 cm 土层,降雨量 17 mm 左右时,湿润深度可达 30 cm 土层,降雨量 20 mm 左右时,湿润深度可达 50 cm 土层。

表 2 日降雨在柠条锦鸡儿固沙林沙丘入渗特征

降雨日期降	日降雨量/mm	降雨历时/h	雨强度/(mm·h ⁻¹)	湿润深度/cm	降雨前土壤体积含水量/%				
					10 cm	30 cm	50 cm	90 m	110 m
5 月 8 日	2.41	3.00	0.80	<10	2.0	2.7	2.9	5.7	3.5
8 月 23 日	8.03	7.50	1.07	10	0.6	1.5	1.0	5.2	4.0
7 月 28 日	9.19	1.50	6.13	10	1.7	2.2	2.7	4.2	2.8
6 月 27 日	17.42	17.00	1.02	30	1.8	1.0	0.8	4.5	3.5
6 月 24 日	20.04	4.50	4.45	50	1.4	1.0	0.8	4.5	3.3

此外,在沙区也时常发生连续降雨,连续日降雨事件同样影响着降雨在沙丘中的入渗过程。从表 3 中可以看出,降雨湿润深度受累计降雨量、降雨强度的双重影响,并随着累计降雨量、降雨强度增加降雨湿润深度也增加。20 mm 左右的降雨湿润深度可达

30 cm;30 mm 的降雨湿润深度可达 50 cm;50 mm 的降雨湿润深度可达 110 cm 层土壤。其中,9 月 8 日至 10 日累计降雨 31.98 mm 和 7 月 21 日至 22 日累计降雨 32.79 mm 时,在降雨量基本相等的情况下,降雨 31.98 mm 湿润深度可达 50 cm 土层,而降

雨 32.79 mm 的累计降雨湿润深度则超 50 cm,原因是后者降雨强度与 0—50 cm 层土壤初始含水量均高于前者。对比表 2 中 6 月 24 日降雨 20.04 mm 与表 3 中 7 月 15 日至 16 日降雨 20.60 mm,同样在降雨量基本相等的条件下,前者在降雨强度 4.45 mm/h 和 0—50 cm 层土壤初始含水量为 1.4%,1.0%,

0.8%时,湿润深度可达 50 cm 层土壤,后者在降雨强度 1.58 mm/h 和 0—50 cm 层土壤初始含水量为 0.7%,1.3%,0.7%时,湿润深度达 30 cm 层土壤。说明降雨量基本相当的情况下,降雨强度与土壤初始含水量显著影响水分入渗深度,及降雨强度越大,土壤初始含水量越高,降雨入渗深度越深。

表 3 连续日降雨在柠条锦鸡儿固沙林沙丘入渗特征

降雨 日期降	日降 雨量/mm	降雨 历时/h	雨强度/ (mm·h ⁻¹)	湿润 深度/cm	降雨前土壤体积含水量/%				
					10 cm	30 cm	50 cm	90 m	110 m
6.11—12 日	6.45	6.0	1.08	10	0.3	1.1	0.8	4.6	3.5
7.15~16 日	20.60	13.0	1.58	30	0.7	1.3	0.7	3.2	2.7
9.8—10 日	31.98	18.0	1.78	50	0.6	1.3	0.9	4.5	3.6
7.21—22 日	32.79	10.5	3.12	>50	2.2	2.4	1.0	3.5	2.9
8.3—5 日	50.27	21.5	2.34	110	2.0	1.9	2.2	5.4	2.8

3 讨论

降水是沙地土壤水分的主要来源,年降水量、降水格局及其在土壤中的入渗和再分配等因素与土壤含水量动态变化密切相关。冯伟等^[17]研究发现,在毛乌素沙地沙柳植被覆盖区,当土壤初始含水量处于较低水平水时,单场 53.8 mm 降雨通过入渗及再分配入渗湿润锋可达到 200 cm 层土壤;土壤含水量处于较高水平时,88.6 mm 单场降雨入渗深度在 150 cm 土层以下,再分配入渗深度达 200 cm 以下。王新平等^[16]研究发现,沙坡头人工植被固沙区在降水分别为 10.9 mm(历时 12 h),14.7 mm(历时 14 h),25 mm(历时 17 h),38.9 mm(历时 38 h)时,水分入渗深度分别可达 5,10,20,60 cm 层土壤。闫德仁等^[18]研究在浑善达克沙地日降雨≤30.3 mm 时,杨柴固沙林与天然草地湿润深度<40 cm 土层;日降雨 40.3 mm 时,杨柴固沙林地湿润深度达 80 cm 土层,天然草地植被达 120 cm 土层。本文研究结果表明,在柠条锦鸡儿固沙林沙丘上,降雨入渗和降雨量、降雨格局与土壤初始含水量同样有密切联系。日降雨量 6~9 mm 的降雨湿润深度可达 10 cm 层土壤;日降雨量 20 mm 左右时湿润深度最小可达 30 cm 土层、最大可达 50 cm 土层;连续日降雨 30 mm 左右时,湿润深度>50 cm 土层;连续日降雨 50 mm 左右时,湿润深度可达 110 cm 土层。说明在不同地区、不同的固沙植被类型对不同降雨事件后的水分入渗深度和进程影响不同,或者说降水的入渗及再分配过程受固沙植被类型的影响表现出不同规律。但是,也有其相同的规律,即降雨的入渗深度因为植被的建立而减少,这不利于降雨对深层土壤水分进行补给。

降雨时,水分不仅要经历蒸发过程,同时还要经历植被截流和表土层吸收的过程,之后才能通过入渗及再分配的过程对深层土壤水分进行有效补给,供植被根系吸收。柠条这种沙生灌木需要通过发达的根系网络从土壤中吸收并获取水分来维持其生长发育^[19]。张莉等^[20]研究发现柠条用来吸收水分的根系分布在 30—90 cm 土层中,而本研究发现只有 46 mm 左右的降雨才能补给 90 cm 土层土壤水分。但是在毛乌素沙地像这样的降雨事件很罕见,随着柠条锦鸡儿生长发育所需水分越来越多,很容易导致其根际土壤水分状况恶化。其次,植被的林龄、盖度、根系发达程度都会对土壤水分入渗及再分配过程产生影响^[12]。梁香韩等^[21]研究发现不同林龄柠条土壤含水量随着土层深度的增加呈逐渐降低趋势。刘凯等^[22]研究发现毛乌素沙地不同林龄人工柠条林地土壤渗透性能大小依次为:15 a>24 a>36 a。随着植被年龄的增加,植被截留降雨的能力越来越强,使水分很难继续下渗,最后浅层土壤形成不透水层,致使深层土壤无法得到降雨补给,从而影响人工固沙植被的稳定性。阿拉木萨等^[12]研究发现 15 a 生人工小叶锦鸡儿植被土壤可形成不透水层,造成植被根际土壤水分状况恶化。而本文研究中选取未进行平茬的 17 a 生柠条锦鸡儿为研究对象可能也存在这种现象,从而影响降雨对深层土壤水分进行补给。在这些综合作用的影响下,以降水为主要来源的毛乌素沙地土壤水分得不到补给降水的补给,人工柠条锦鸡儿固沙林生长发育所需水分将会严重亏缺,致使植被逐渐退化,这是导致毛乌素沙地进一步退化的主要原因。

本研究降雨入渗为天然降雨,在试验期间降雨不是很均一,且大都为小降雨,相对大的降雨分布较少。

但是在 50 mm 左右降雨时,水分入渗深可达 110 cm 土层,水分是否入渗并影响到 110 cm 以下土层受到本试验监测深度限制无法确定,因此,在今后的研究中应将监测深度提升至更深土层,从而对降雨入渗过程做出更全面的解释。

4 结论

(1) 柠条锦鸡儿固沙林沙丘不同土层土壤含水量动态变化受降雨量、累计降雨量和降雨入渗效应等综合因素的影响。特别是累计降雨量和 90 cm 以下土层含水量密切相关,且对 90 cm 层土壤含水量具有滞后效应,尤其是在 110 cm 层土壤含水量增加时的滞后效应尤为明显。

(2) 柠条锦鸡儿固沙林沙丘受降雨量、降雨强度以及土壤初始含水量多重因素的影响,降雨量与降雨强度的增加,降雨湿润深度也随之增加。降雨量 < 5 mm 时,湿润深度 < 5 cm;降雨量 10 mm 左右时,湿润深度 < 30 cm;降雨量 20 mm 左右时湿润深度 30—50 cm;降雨量 30 mm 时,湿润深度 > 50 cm;降雨量 46 mm 时湿润深度可达 110 cm 土层。此外,当降雨量基本相等时,降雨强度与土壤初始含水量对入渗深度及进程有明显影响,即降雨强度越大,土壤初始含水量越高,降雨入渗深度越渗,入渗历时越短。

(3) 柠条锦鸡儿固沙林沙丘 10,30,50 cm 土层土壤含水量存在 3 个上升期,90,110 cm 土层存在 1 个上升期,而上升期结束后土壤含水量持续降低,说明降雨对柠条锦鸡儿固沙林沙丘水分状况有补给作用,但是 90 cm 层以下土壤水分受该地区降雨补给能力有限。

参考文献:

- [1] Simmons M T, Archer S R, Teague W R, et al. Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: An experimental assessment of above-and belowground interactions in a temperate savanna[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008,72(4):0-325.
- [2] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J].*水利学报*,2006,37(2):166-171.
- [3] 李卫,冯伟,杨文斌,等.流动沙丘水分深层入渗量与降雨的关系[J].*水科学进展*,2015,26(6):779-786.
- [4] 杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等.沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响[J].*生态学报*,2012,32(24):7757-7763.
- [5] 孙景宽,张文辉,张洁明,等.种子萌发期 4 种植物对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J].*西北植物学报*,2006,26(9):1811-1818.
- [6] 蔡仕珍,潘远智,陈其兵,等. PEG 胁迫对柠条种子萌发及生理特性的影响[J].*种子*,2011,30(5):42-45.
- [7] 肖萌,丁国栋,汪晓峰,等.沙埋和水分对 3 种灌草植物种子萌发及出苗的影响[J].*中国水土保持科学*,2014,12(4):106-111.
- [8] 曾彦军,王彦荣,萨仁,等.几种旱生灌木种子萌发对干旱胁迫的响应[J].*应用生态学报*,2002,13(8):953-956.
- [9] 高玉寒,姚云峰,郭月峰,等.柠条锦鸡儿细根表面积密度对土壤水分空间分布的响应[J].*农业工程学报*,2017,33(5):136-142.
- [10] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.农牧交错带柠条锦鸡儿根系与土壤水分空间关系研究[J].*中国农业科技导报*,2017,19(7):101-107.
- [11] 杨文斌,任建民,杨茂仁,等.柠条锦鸡儿、沙柳蒸腾速率与水分关系分析[J].*内蒙古林业科技*,1995(3):1-6.
- [12] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁璠.科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究[J].*生态学杂志*,2004,23(1):56-59.
- [13] 梁香寒.毛乌素沙地土壤水分动态与降水再分配规律[D].北京:北京林业大学,2016.
- [14] 严正升.黄土丘陵半干旱区人工柠条林地土壤水分动态研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [15] 冯伟,李卫,杨文斌.不同固沙植被下沙丘土壤水分动态比较[J].*北方园艺*,2019(6):108-115.
- [16] 王新平,李新荣,张景光.沙坡头人工植被固沙区天然降水的入渗和分配研究[J].*中国沙漠*,2002,22(6):12-18.
- [17] 冯伟,杨文斌,李卫,等.毛乌素沙地沙柳固定沙丘土壤水分对降雨的响应[J].*水土保持学报*,2014,28(5):95-99.
- [18] 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.
- [19] 李红丽,董智,王林和,等.浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J].*干旱区资源与环境*,2002,16(4):99-105.
- [20] 张莉,吴斌,丁国栋,等.毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J].*干旱区资源与环境*,2010,24(3):158-161.
- [21] 梁香寒,张克斌,乔厦.半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J].*生态环境学报*,2019,28(9):1748-1756.
- [22] 刘凯,王磊,宋乃平,等.毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究[J].*干旱区资源与环境*,2013,27(5):89-94.