

DOI: 10.5846/stxb201802080346

吴丽丽,程一本,杨文斌,朱斌,党宏忠,李卫,冯伟.毛乌素沙地流动沙丘不同深度土壤渗漏特征.生态学报,2018,38(22): - .

Wu L L, Cheng Y B, Yang W B, Zhu B, Dang H Z, Li W, Feng W. Analysis of the soil percolation characteristics at different depths of a mobile sand dune in the Mu Us sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

毛乌素沙地流动沙丘不同深度土壤渗漏特征

吴丽丽¹, 程一本¹, 杨文斌^{1,*}, 朱斌², 党宏忠¹, 李卫¹, 冯伟³

¹ 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

² 中国治沙暨沙业学会, 北京 100714

³ 锡林郭勒职业学院, 锡林浩特 026000

摘要:沙地的土壤深漏是沙地水分循环及水量平衡中的重要环节,对这一分量的准确测算,能够增进对沙地降雨的分配、转移及运输过程规律的认识。利用土壤深层水量渗漏测试记录仪(YWB-01),对毛乌素沙地典型的流动沙丘 50、100 cm 和 200 cm 的 3 个层次的土壤渗漏水量进行定点实时监测,定量分析降雨条件下沙地土壤渗漏特征,得出以下结论:(1)在降雨条件下,2016 年 4—6 月 3 个沙层的渗漏过程都不明显,从 7 月开始,渗漏过程与降雨过程的一致性随沙层的增加而逐渐减弱;(2)随沙层深度的增加,累计渗漏天数以及连续渗漏天数在增加,累计渗漏水量、最大日渗漏水量逐渐减小,渗漏水量的波动也逐渐减小;渗漏水量>10 mm 的天数和渗漏水量所占的比例明显减少;(3)对降雨量和各沙层渗漏水量日、周、半月、月累积量之间进行相关分析和线性拟合后发现,越往深处渗漏水量对降雨的响应越弱,月渗漏水量与月降雨量的关系更密切。

关键词:渗漏水量;降雨量;深度;流动沙丘;毛乌素沙地

Analysis of the soil percolation characteristics at different depths of a mobile sand dune in the Mu Us sandy land

WU Lili¹, CHENG Yiben¹, YANG Wenbin^{1,*}, ZHU Bin², DANG Hongzhong¹, LI Wei¹, FENG Wei³

¹ Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

² China Sand Control and Sand Industry Society, Beijing 100714, China

³ Xilin-gol Vocational College, Xilinhot 026000, China

Abstract: Soil percolation is an important part of the water cycle and water balance in sandy land. Accurately estimating this component could enhance understanding of the distribution, transfer, and transportation processes for rainfall in sandy land. In this study, the percolation at 50 cm, 100 cm, and 200 cm depth in a typical mobile sandy dune on the Mu Us sandy land was monitored in real time using a YWB-01 percolation recorder. The soil percolation characteristics in sandy land under rainfall conditions were analyzed, and the following conclusions were drawn: (1) under rainfall conditions, the percolation process between April and June, 2016 in the three layers was not obvious. From July, the consistency of the percolation and rainfall processes gradually weakened as depth increased. (2) The total percolation days and the continuous percolation days rose when depth increased, but the total percolation, daily percolation, and the daily percolation fluctuation gradually decreased. The proportion of the number of days of percolation > 10 mm and the percolation amounts on those days decreased. (3) The results showed the percolation response to rain weakened as depth increased, and that monthly percolation and monthly rainfall were the most closely related according to the correlation analysis and the linear fitting between rainfall and percolation by day, week, half-a-month, and month.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771306)

收稿日期:2018-02-08; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nmlkyywb@163.com

Key Words: percolation; precipitation; depth; mobile sandy dune; Mu us sandy land

降雨入渗到土体后,从某一深度的土层渗漏出去的水量称为土壤渗漏水量^[1-2]。由于沙区的地下水埋藏较深,深层渗漏过程一般是不连续的,受到降雨、蒸散和地形、地貌特征的综合影响,定量估算深层渗漏量尤为困难^[3-4]。之前对于土壤渗漏的研究多集中在森林、农田等方面,与这些生态系统内其他几个水分循环分量相比,土壤渗漏水量所占比例较小,大多数的研究都将这一分量进行简单的估算,或者直接忽略不计^[5-7]。而沙地的土壤深漏是大气降水转化为地下水的关键环节,也是沙地水分循环及水量平衡中的重要环节^[8-11]。对这一分量的准确测算,能够增进对沙地降雨的分配、转移及运输过程中定性及定量规律的认识^[12-15]。

目前针对土壤水分深层渗漏研究方法和监测手段上,主要有经验方程法、物理方法、示踪方法和数值模拟等^[16-18]。近些年,一种渗漏水量的直接监测仪器在研究中逐渐应用(土壤深层渗漏水量记录仪,专利号:ZL201110252184.7),它适应于沙漠、森林、农田、河道等多种土壤类型深层渗漏水量监测,并在沙漠水分深层渗漏监测方面取得了较为准确的渗漏量数据及渗漏过程动态特征^[19-21]。本研究利用土壤深层水量渗漏测试记录仪对毛乌素沙地典型的流动沙丘 50、100 cm 和 200 cm 3 个层次的土壤渗漏水量进行定点实时监测,定量分析降雨条件下沙地土壤渗漏特征,研究将对系统揭示沙地生态系统内水分的动态过程提供依据,并为毛乌素沙区水资源评估提供可靠的数据。

1 研究区概况

依据我国干旱、半干旱区流动沙地降雨的深层渗漏量及动态变化的研究结果看,除遇极端降雨年份外,自然降水条件下,半干旱区深层土壤(150 cm 以下)具有明显的渗漏^[1],故在本项研究中,将研究区选在半干旱区的毛乌素沙地(年降雨量 250—400 mm)的东北缘(图 1),行政区划隶属于内蒙古自治区伊金霍洛旗查干淖尔嘎查(39°05'N,109°36'E,海拔 1306 m),丘间地地下水埋深 5.3—6.8 m。年均气温 6.4℃,年降水量 360.8 mm,年蒸发量 2592 mm,年平均风速 3.6 m/s,平均日照时间 2900 h,平均相对湿度 52%,属于典型的温带大陆性气候。地貌以流动沙丘为主,沙丘高 6—12 m。研究区风沙土的土壤容重为 1.57 g/cm³,田间持水量为 6.85%,最大持水量为 14.82%,表层(0—5 cm)稳定入渗速率为 3.8 mm/min。

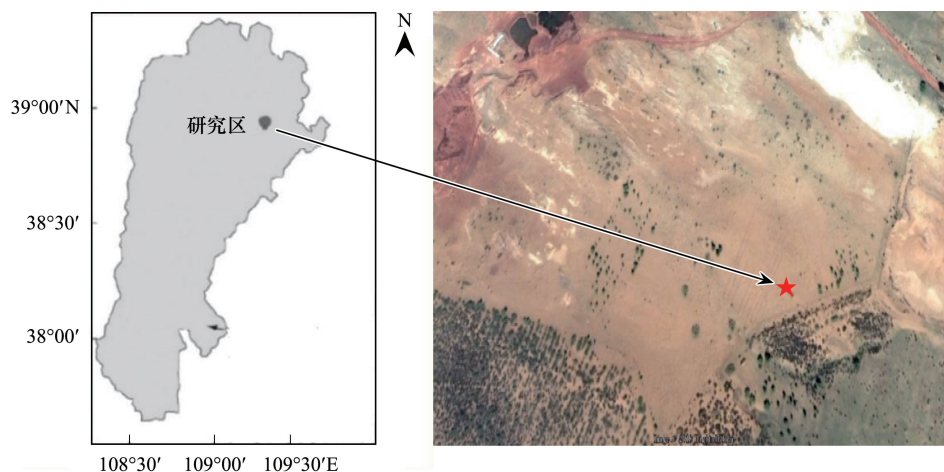


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

2 试验方法

2.1 渗漏水量的测定

本研究采用土壤深层水分渗漏计量仪(分辨率 0.2 mm,精度±2%)实时监测。深度为 200 cm 沙层渗漏仪

布设过程如下:首先在沙丘的丘间低地选定监测点,挖取 320 cm 深土壤剖面,从下到上依次将渗漏仪排水部(15 cm)、计量部(35 cm)、集流部(5 cm,砾石、陶粒填充)、毛管持水部(65 cm,原状土填充)紧靠完整剖面一侧装入,此时毛管持水部上沿在土壤 200 cm 深度,计量部将记录渗漏到 200 cm 以下的水量;用水平仪调平后,将渗漏仪置入并将数据采集线接出地面。渗漏桶内加入足量的水,并对渗漏仪进行检验,以确保工作正常。同理,相邻的挖取 220 cm 深土壤剖面 and 170 cm 深土壤剖面,分别安装 100 cm 沙层渗漏仪以及 50 cm 沙层渗漏仪。

仪器安装的时间为 2012 年 9 月,本文选用 2016 年 4 月 1 日到 2017 年 3 月 31 日的连续数据,可以将仪器安装对土壤结构的影响忽略。定期对仪器进行维护,并确保沙地处于裸露流动状态。监测数据每 30 min 记录一次,0:30—24:00 记录数据的和为当天的渗漏量。

2.2 降雨量的测定

采用美国 AVALON 公司 AV-3665R 雨量自动监测系统(分辨率 0.2 mm,精度 $\pm 2\%$)记录降雨量,记录频度与渗漏仪保持一致,同为每 30 min 一次。

2.3 数据处理

本实验中,对所有的数据采用 EXCEL 软件进行统计分析,并采用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行 Pearson 相关性分析,分析降雨量和土壤深层渗漏量之间的相关性,当显著性检验值 $P < 0.05$ 时为显著性差异, $P < 0.01$ 为极显著性差异。利用 Origin 9.1 软件进行图表的绘制。

3 结果

3.1 流动沙丘不同深度土壤渗漏的动态特征

3.1.1 沙地土壤渗漏的日动态特征分析

整个监测期内,50 cm 沙层、100 cm 沙层和 200 cm 沙层的渗漏水量分别是降雨量的 73.04%、69.52% 和 52.16%。总体来看,50 cm 沙层第一次明显渗漏出现在 2016 年 7 月 9 日,为 30 mm,最多连续渗漏天数为 35 天,日渗漏水量的波动系数为 4.7052,波动较大;100 cm 沙层第一次明显渗漏出现在 7 月 10 日,为 16 mm,最多连续渗漏天数为 111 d,日渗漏水量的波动系数为 3.0993,波动有所降低;200 cm 沙层第一次明显渗漏出现在 7 月 9 日,为 5.4 mm,最多连续渗漏天数为 121 d,日渗漏水量的波动系数为 2.1742,波动较小(图 2)。

3.1.2 沙地土壤渗漏的月动态特征分析

从图 3、图 4 可以看出,由于 2016 年 4—6 月由于降雨主要用来补充沙层的含水量,以及渗漏对降雨响应的延迟性等原因,使得这期间的渗漏过程都不明显。

50 cm 沙层的渗漏总量和渗漏频率在 8 月达到最大,7—9 月的渗漏总量占整个监测期的 93.13%;之后一直到 2017 年 3 月,期间虽然渗漏频率占该层整个监测期的 47.53%,但总渗漏量仅占整个监测期的 6.62%。

100 cm 沙层的渗漏总量在 7 月达到最大,明显的渗漏一直延续到 11 月,这段期间的渗漏总量占整个监测期的 95.66%;之后一直到 2017 年 3 月,期间虽然渗漏频率占该层整个监测期的 28.71%,但总渗漏量仅占整个监测期的 4.03%,且每月的渗漏量和渗漏频率都在逐渐减少。

200 cm 沙层的渗漏总量同 100 cm 沙层一样,在 7 月达到最大,明显的渗漏延续到 10 月,这段期间的渗漏总量占整个监测期的 94.07%;之后一直到 2017 年 3 月,期间虽然渗漏频率占该层整个监测期的 40.91%,但总渗漏量仅占整个监测期的 5.79%,且每月的渗漏量和渗漏频率都在逐渐减少。

3.2 降雨量与流动沙丘不同深度土壤渗漏水量的分布特征

3.2.1 降雨及各沙层渗漏不同强度累计天数分布特征

如图 5 所示,整个监测日期共 365 d。其中,监测到降雨的天数为 70 d,累计降雨量为 549.8 mm,最大日降雨量为 66.7 mm。 $0 < \text{降雨强度} \leq 5$ mm 的天数占全年的 12.6%,降雨量 > 25 mm 的天数占全年的 1.37%。

监测到 50 cm 沙层渗漏的天数为 162 d,累计渗漏水量为 401.6 mm,最大日渗漏水量为 37.1 mm。 $0 < \text{渗漏}$

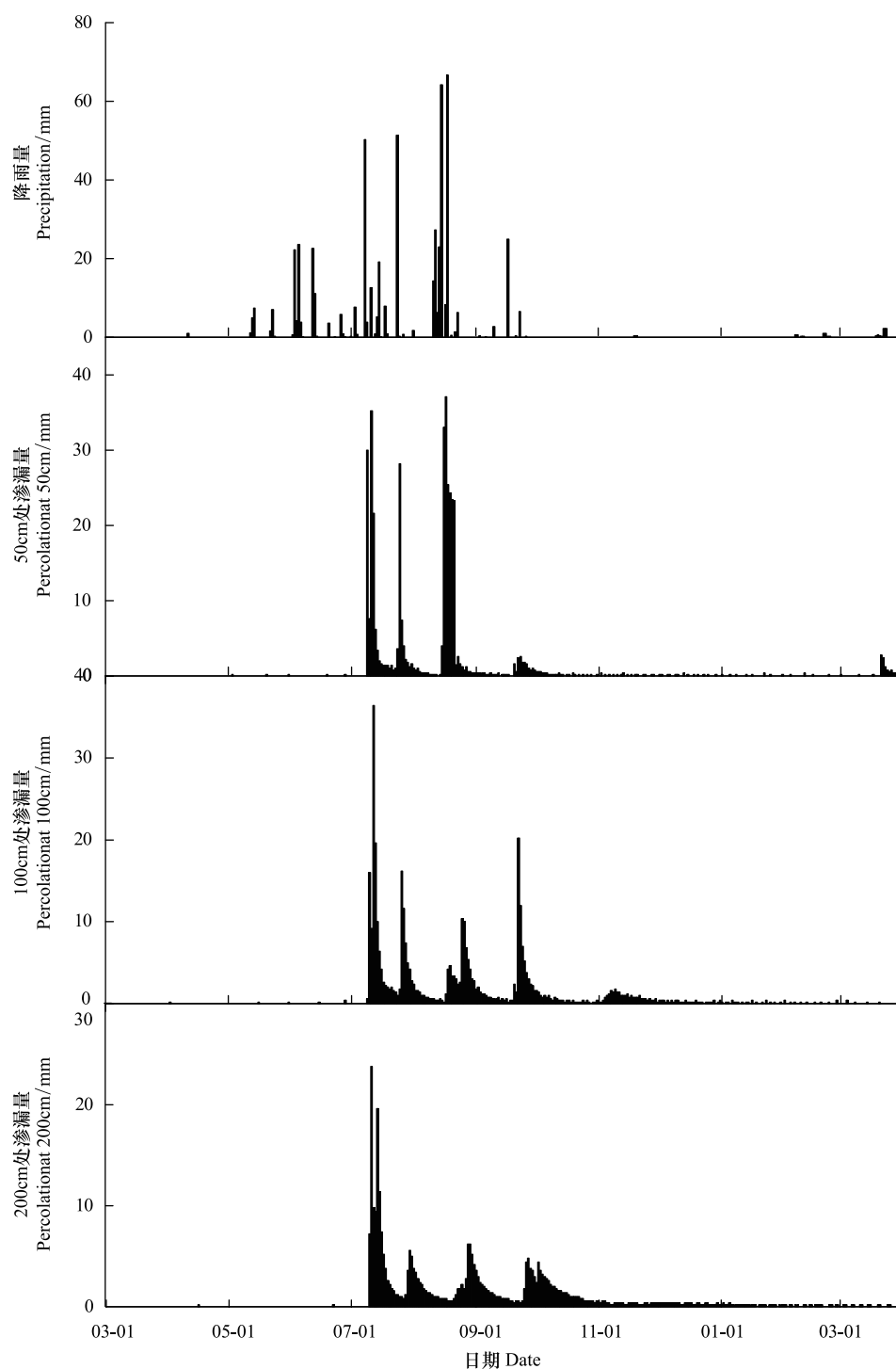


图2 降雨量与不同深度沙层土壤渗漏水量的日分布

Fig.2 Daily precipitation and percolation of different depths of sand soil

水量 ≤ 1 mm 的天数占全年的 33.15%, 渗漏水量 >10 mm 的天数占全年的 2.74%。

监测到 100 cm 沙层渗漏的天数为 209 d, 累计渗漏水量 382.2 mm, 最大日渗漏水量为 36.4 mm。0 $<$ 渗漏水量 ≤ 1 mm 的天数占全年的 39.45%, 渗漏水量 >10 mm 的天数占全年的 2.19%。

监测到 200 cm 沙层渗漏的天数为 198 d, 累计渗漏水量 286.8 mm, 最大日渗漏水量为 25.2 mm。0 $<$ 渗漏水量 ≤ 1 mm 的天数占全年的 36.99%, 渗漏水量 >10 mm 的天数占全年的 0.82%。

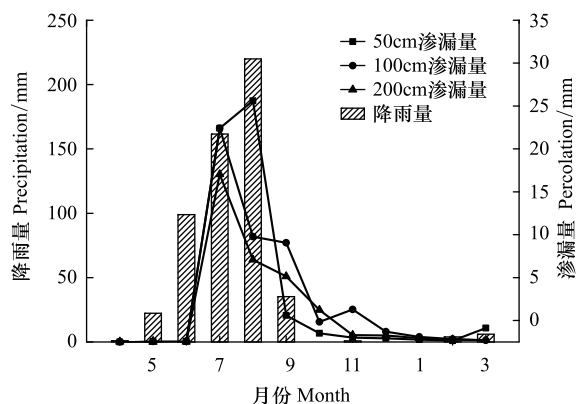


图3 降雨量与不同深度深渗透水量的月份分布

Fig.3 Monthly precipitation and percolation of different depths of sand soil

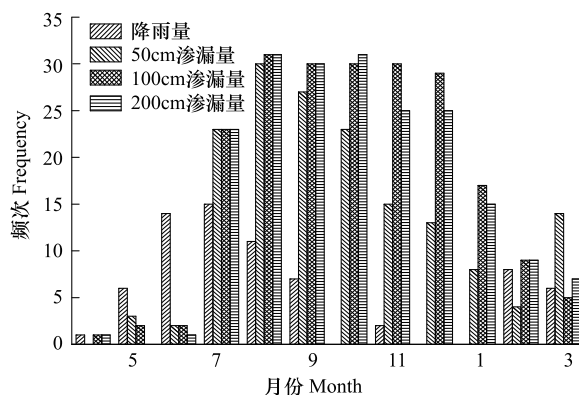


图4 降雨与不同深度沙层渗透频次的月份分布

Fig.4 Monthly precipitation frequency and percolation frequency of different depths of sand soil

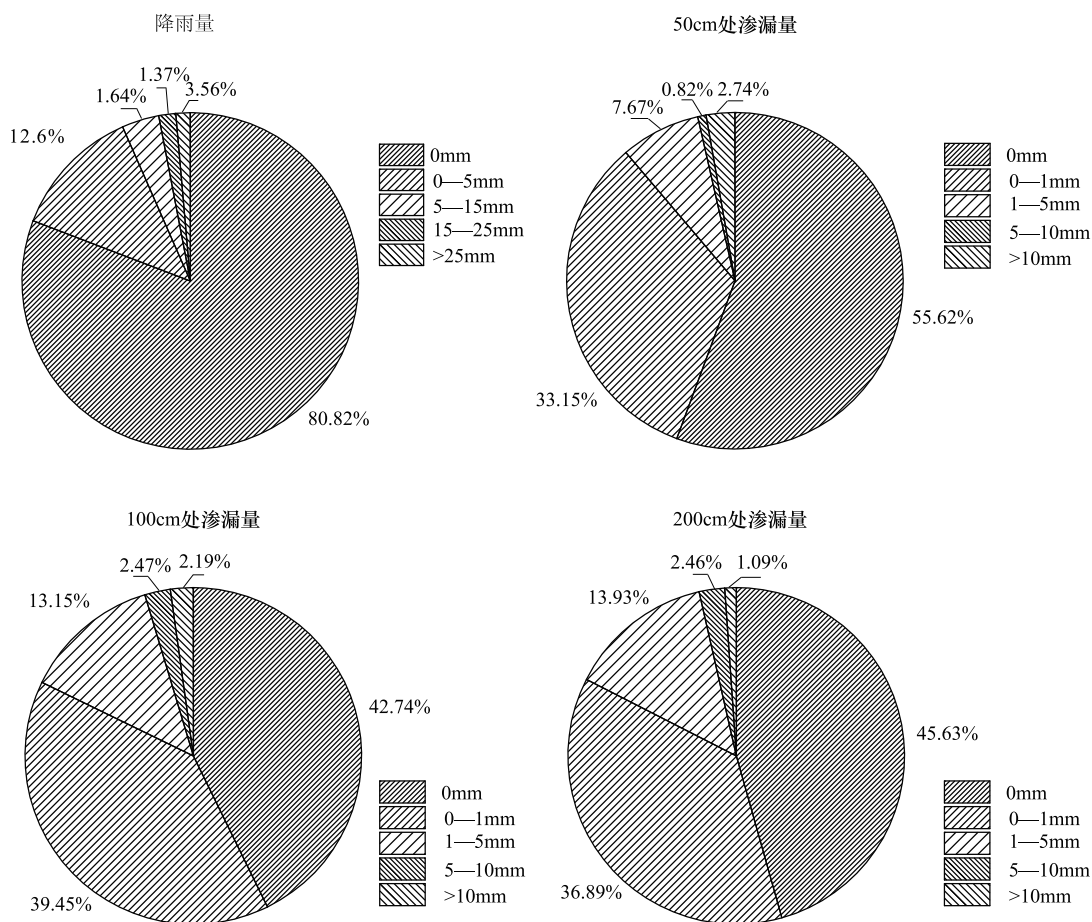


图5 降雨及各沙层渗透不同强度累计天数分布图

Fig.5 Accumulative days distribution of different precipitation intensities and percolation intensities

3.2.2 降雨及各沙层渗透不同强度累计量分布特征

监测到 $0 < \text{降雨强度} \leq 5 \text{ mm}$ 的累计量占总累计降雨量的 8.75%; 降雨量 $> 25 \text{ mm}$ 的累计量占总累计降雨量的 47.27%。50 cm 处沙层 $0 < \text{渗透水量} \leq 1 \text{ mm}$ 的累计量占总渗透水量的 10.36%; 而渗透水量 $> 10 \text{ mm}$ 的累计量达到总渗透水量的 70.09%。100 cm 处沙层 $0 < \text{渗透水量} \leq 1 \text{ mm}$ 的累计量占总渗透水量的 16.12%; 渗透

水量>10 mm 的累计量达到总渗漏水量的 37.26%。200 cm 处沙层 0<渗漏水量≤1 mm 的累计量占总渗漏水量的 18.06%;而渗漏水量>10 mm 的累计量达到总渗漏水量的 19.87%(图 6)。

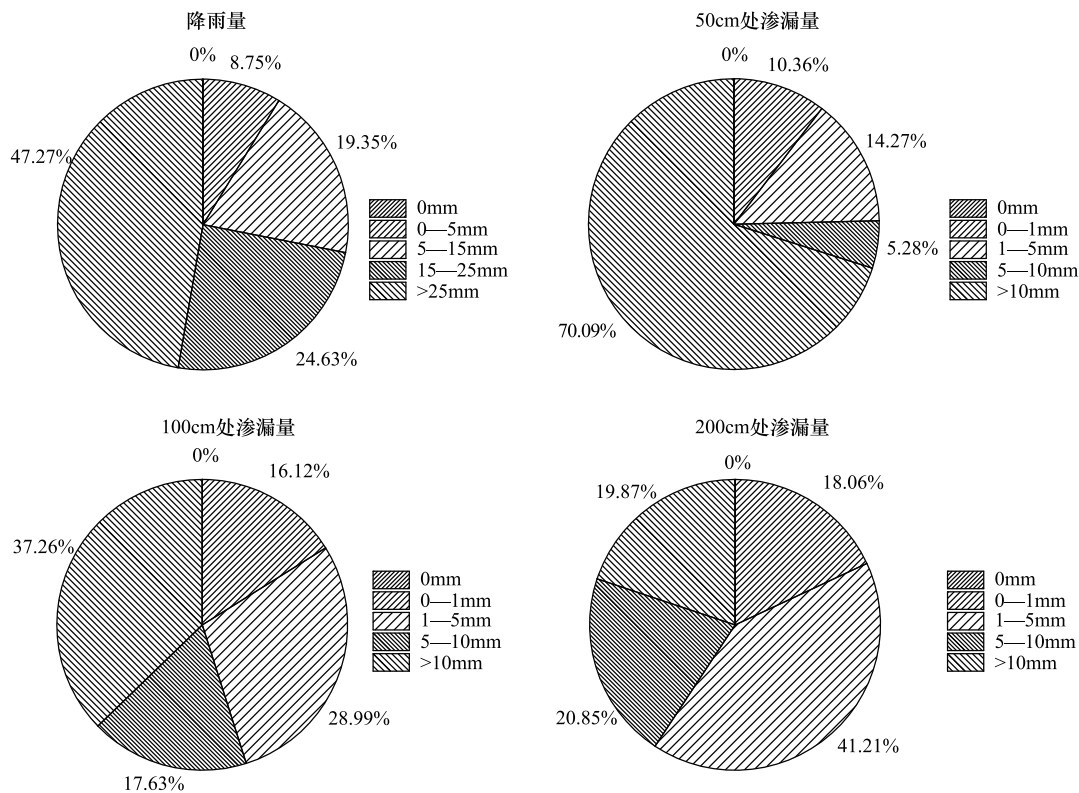


图 6 降雨及各层渗透不同强度累计量分布图

Fig.6 Accumulative amounts distribution of different precipitation intensities and percolation intensities

3.3 降雨量与流动沙丘不同深度土壤渗漏水量的关系

大气降水是沙地的主要来源,因此,降雨量与各层渗漏水量之间必然存在着相关关系。由于渗漏具有延迟性等特征,对观测时间进行了累计,分别对日、周、半月、月累计的降雨量和各层渗漏水量之间进行 Pearson 相关分析,从表 1 可以看出:日、周、半月、月累计的降雨量和 50 cm 沙层渗漏水量之间都显著相关($P<0.01$);周、半月、月累计的降雨量和 100 cm 沙层渗漏水量之间都显著相关($P<0.01$);半月累计降雨量和 200 cm 沙层渗漏水量之间在 0.01 水平上显著相关,月累计量在 0.05 水平上显著相关。对 3 组数分别进行线性拟合后发现,对于每一组来说月累计量的 R^2 都是最大的(图 7)。

表 1 降雨量与不同深度沙层渗漏水量之间的相关关系

Table 1 The correlativity between precipitation and percolation of different depths of sand soil

沙层 Layer	50 cm	100 cm	200 cm	沙层 Layer	50 cm	100 cm	200 cm
日 Day	0.213 **	0.035	0.039	半月 Half-a-month	0.574 **	0.592 **	0.653 **
周 Week	0.756 **	0.335 *	0.285 **	月 Month	0.917 **	0.717 **	0.729 **

** 在.01 水平(双侧)上显著相关,* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

4 结论与讨论

(1) 冯伟等研究指出^[19],流动沙地深层渗漏量与降雨变化时间上具有相对一致性,渗漏补给高峰出现在雨季,但降雨对深层渗漏的补给具有滞后性和延时性。本研究通过对 3 个沙层土壤渗漏的动态特征分析发现,在降雨条件下,在 2016 年 4—6 月监测到总降雨量为 122. mm,但 3 个沙层的渗漏过程都不明显;从 7 月开

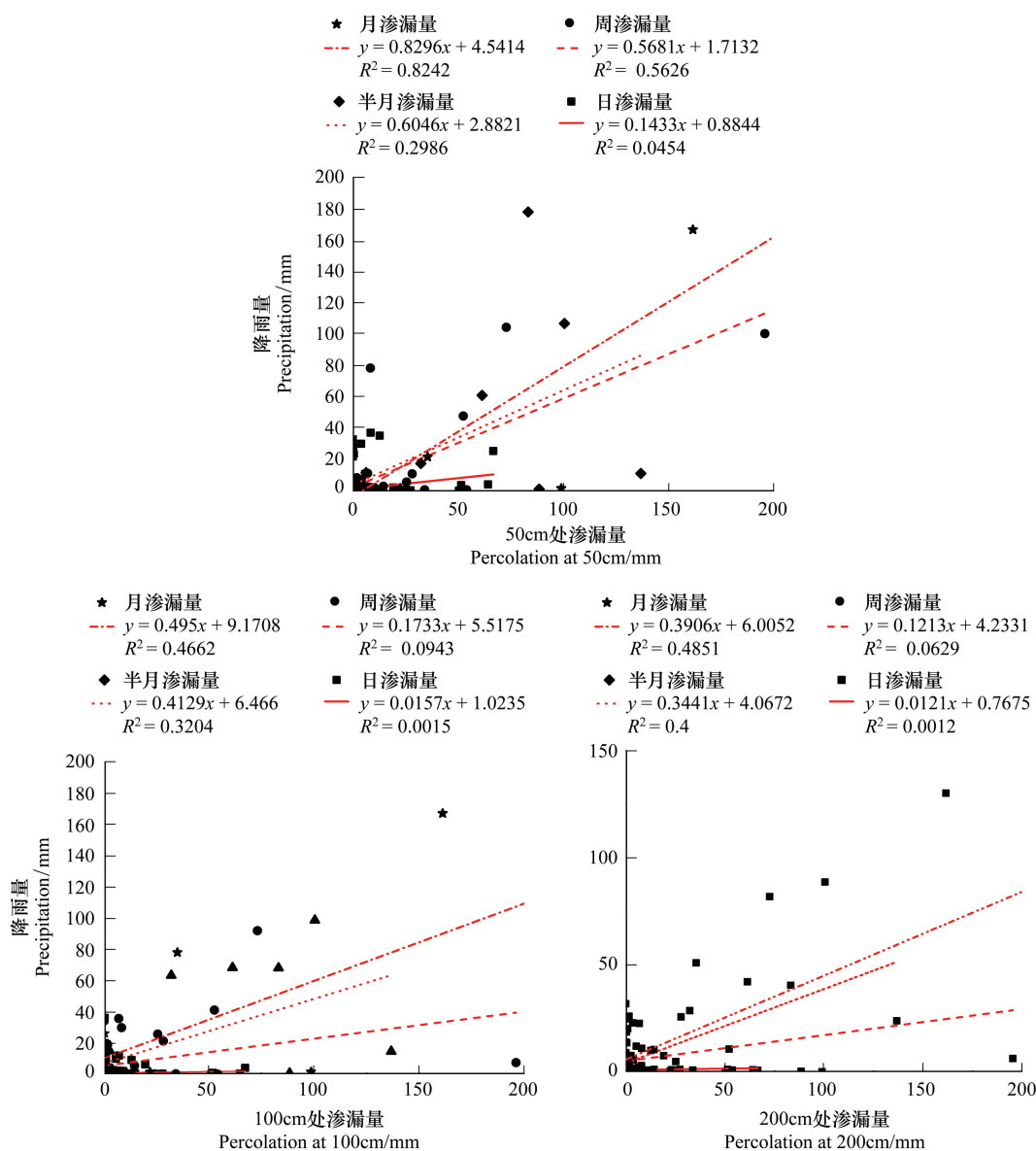


图7 降雨量与各沙层渗漏水量之间的相关关系

Fig.7 The correlativity between precipitation and percolation at different layers

始,渗漏过程与降雨过程的一致性随沙层的增加而逐渐减弱,记录到明显的渗漏的时间和频率,随沙层的增加而逐渐增加。

(2)通过对3个沙层渗漏水量的分布特征分析发现,在降雨条件下,整个观测期内记录到渗漏的天数,虽然随沙层深度的增加而增加,但累计渗漏水量逐渐减少,主要原因在于渗漏水量 >10 mm的天数减少,导致这一部分的累计渗漏水量大幅度的减少,即渗漏强度对3个沙层的累计渗漏水量影响较大。李卫等研究指出^[20],地表以下150 cm深度的日入渗补给量 ≤ 1 mm有532 d,入渗补给量仅占31%,而 >1 mm有85 d,入渗补给量所占比例高达69%,与本研究的结果基本一致。

(3)本研究对降雨量和各沙层渗漏水量日、周、半月、月累积量之间进行相关分析和线性拟合后发现,50 cm沙层渗漏水量对降雨的响应最强,越往深处渗漏水量对降雨的响应越弱。姚冬梅等研究发现,深层渗漏量和降雨量之间均呈显著正相关关系,随着累计天数的增加,深层渗漏量和降雨量的相关关系更好^[21]。本研究结果证明,对于50、100 cm和200 cm3个沙层的渗漏水量来说,月累积量的 R^2 都是最大的,即月渗漏水量的变

化与月降雨量的变化关系更密切。

(4) 由于前期对于沙地土壤深漏水量的研究还比较少,本研究也只是对毛乌素沙地流动沙丘不同深度土壤渗漏水量的分布特征、动态特征以及与降雨量的相关性等方面进行了简单分析,对影响沙地土壤渗漏的其他因子,如降雨强度、土壤含水量等方面还有待于进一步研究。此外,本研究采用的监测时间还比较短,为了能对影响沙地土壤渗漏有更清楚的认识,还需要进行长期连续的监测。

参考文献 (References):

- [1] 冯伟, 杨文斌, 唐进年, 李卫, 党宏忠, 梁海荣, 张志山. 中国沙漠(地)深层渗漏量及动态特征. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1362-1370.
- [2] Yang W B, Tang J N, Liang H R, Dang H Z, Li W. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1816-1824.
- [3] Cheng Y B, Zhan H B, Yang W B, Dang H Z, Li W. Is annual recharge coefficient a valid concept in arid and semi-arid region? *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(10): 5031-5042.
- [4] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 岳广阳. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程. 水利学报, 2006, 37(2): 166-171.
- [5] Finch J W. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model——sensitivity to land surface parameters. *Journal of Hydrology*, 1998, 211(1/4): 112-125.
- [6] 蒋俊. 南小河流域林地土壤水分动态特征及水量平衡研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [7] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2): 197-205.
- [8] 原鹏飞, 丁国栋, 王炜炜, 王翔宇, 石慧书. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 23-27.
- [9] 冯伟, 杨文斌, 党宏忠, 李卫, 石星, 王永胜, 梁海荣. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应. 中国沙漠, 2015, 35(2): 400-406.
- [10] 常兆丰, 汪杰, 王耀琳, 韩福贵, 仲生年, 李昌龙. 降水在沙丘中的运动特征研究——以甘肃民勤沙区为例. 中国沙漠, 2005, 25(3): 422-426.
- [11] 吕德燕. 半干旱沙区流动沙丘在区域水量平衡中的作用[D]. 烟台: 鲁东大学, 2016.
- [12] Rummel B, Felix-Henningsen P. Soil water balance of an arid linear sand dune. *International Agrophysics*, 2004, 18(4): 333-337.
- [13] 冯伟, 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 梁海荣. 毛乌素沙地沙柳固定沙丘土壤水分对降雨的响应. 水土保持学报, 2014, 28(5): 95-99.
- [14] Descroix L, Laurent J P, Vauclin M, Amogu O, Boubkraoui S, Ibrahim B, Galle S, Cappelaere B, Bousquet S, Mamadou I, Le Breton E, Lebel T, Quantin G, Ramier D, Boulain N. Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology*, 2012, 424-425: 1-15.
- [15] Cable J M, Huxman T E. Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, 2004, 141(2): 317-324.
- [16] 蒙宽宏. 土壤水分入渗测定方法及影响因素[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006, 1-38.
- [17] Gogolev M I. Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. *Environmental Geology*, 2002, 42(2/3): 248-258.
- [18] 段良霞, 黄明斌. 干旱-半干旱地区深层渗漏研究方法综述. 中国水土保持科学, 2016, 14(2): 155-162.
- [19] 冯伟. 毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [20] 李卫, 冯伟, 杨文斌, 唐进年, 党宏忠. 流动沙丘水分深层入渗量与降雨的关系. 水科学进展, 2015, 26(6): 779-786.
- [21] 姚冬梅, 冯金超, 冯伟, 梁海荣, 杨文斌, 党宏忠, 吴丽丽. 毛乌素沙地典型流动沙丘水分深层渗漏量及动态特征. 中国沙漠, 2017, 37(2): 222-227.