

DOI: 10.5846/stxb201808121721

李新乐, 吴波, 张建平, 辛智鸣, 董雪, 段瑞兵. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应. 生态学报, 2019, 39(15): - .

Li X L, Wu B, Zhang J P, Xin Z M, Dong X, Duan R B. Dynamics of shallow soil water content in *Nitraria tangutorum* nebkha and response to rainfall. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): - .

白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应

李新乐^{1,2,3}, 吴 波^{1,*}, 张建平², 辛智鸣^{2,3}, 董 雪², 段瑞兵^{2,3}

1 中国林业科学研究院, 荒漠化研究所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200

3 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 磴口 015200

摘要:以乌兰布和沙漠典型白刺沙包为研究对象,使用 EC-5 土壤水分传感器对其浅层(0—50 cm)土壤水分进行长期连续监测,分析了白刺沙包不同深度土层对不同降雨量的响应及整个生长季的土壤水分动态特征。结果表明:降雨是乌兰布和沙漠白刺沙包土壤水分的最重要补给源,降雨量大小是影响浅层土壤水分补给深度的决定因素。小于 10 mm 的降雨完全被表层(0—10 cm)土壤吸收,无法补给 10 cm 以下土壤水分;10—20 mm 的降雨对土壤水分的补给深度达到 20 cm;20—30 mm 的降雨对土壤水分的补给深度达到 40 cm,大于 30 mm 的降雨补给深度可达到 50 cm,甚至更深土层。在研究区降雨量以小于 20 mm 降雨为主的情况下,20 cm 以下土层土壤水分逐步恶化,久之将有利于浅根系草本植物的生长,不利于白刺的生长繁殖。因此,这种降雨格局将对浅层土壤水分及植被演替产生重要影响。

关键词:土壤水分垂直分布;土壤水分动态;降雨量;白刺沙包

Dynamics of shallow soil water content in *Nitraria tangutorum* nebkha and response to rainfall

LI Xinle^{1,2,3}, WU Bo^{1,*}, ZHANG Jianping², XIN Zhiming^{2,3}, DONG Xue², DUAN Ruibing^{2,3}

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

2 Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China

3 Dengkou Desert Ecosystem Research Station of Inner Mongolia, Dengkou 015200, China

Abstract: This study examined typical *Nitraria tangutorum* nebkha in the UlanBuh desert. An EC-5 soil moisture sensor was used for long-term monitoring of the shallow (0—50 cm) soil water content. We analyzed the responses of different soil layers to different rainfall and soil water content dynamics in a *Nitraria tangutorum* nebkha during the growing seasons of 2015—2017. The results showed that rainfall was the most important supply source for soil water content. The amount of rainfall was the major factor affecting the depth of water supply in shallow soils. Rainfall <10 mm was completely absorbed by the surface soil (0—10 cm), and was unable to replenish soil water content below the 10 cm soil layer. Rainfall between 10 and 20 mm replenished soil water content to the 20 cm soil layer; rainfall between 20 and 30 mm replenished soil water content to the 40 cm soil layer; and rainfall >30 mm replenished soil water content to the 50 cm soil layer. In the case of rainfall <20 mm, the soil water content of the study area below 20 cm could gradually deteriorate, which could promote the growth of shallow root herbaceous plants, leading to a decline of the *Nitraria tangutorum* community. Rainfall patterns have an important impact on shallow soil water content and vegetation succession.

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017QA028);国家自然科学基金项目(31600394)

收稿日期:2018-08-12; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 2205203329@qq.com

Key Words: vertical distribution of soil water content; soil water content dynamics; rainfall; *Nitraria tangutorum* nebkha

土壤水分是干旱区植被生存和发展的主要限制因子^[1]。在植被生长发育过程中,大气降雨作为土壤水分补给的重要来源,降雨入渗决定着土壤水分的分布特征,进而影响植被的生长情况和稳定性^[2]。全球变暖改变了全球的降雨格局,包括降雨量、降雨的频率、强度和季节分配等^[3]。许多气候变化研究都预测今后的极端干旱和降雨事件将更频繁^[4],导致土壤水分缺乏的周期延长,土壤水分含量的可变性增加^[5]。研究土壤水分的空间变异及时间动态特征有助于在水文过程与生态格局之间建立定量的联系,由于土壤水分对整个地球系统的重要性,它的时间和空间变化日益引起水文界的广泛关注^[6-7]。干旱荒漠区年降雨量稀少,土壤水分在整个生物过程中的作用就显得尤为重要^[8-9]。

近年来,越来越多的学者开始关注干旱区降雨变化对土壤水分的影响。国外学者就土壤水分入渗等问题做了大量研究,Matsui 等^[10]研究了土壤水分入渗与土壤含水量的关系,建立了土壤水分入渗速率与时间的数学表达式。国内也开展了大量的相关研究,涉及土壤初始状况对入渗的影响^[11]、降雨与坡面径流特征^[12]、降雨与入渗深度^[13]、沙丘或特定植被群落的土壤水分动态^[14-15]、降雨入渗再分配^[16]、土壤水分空间异质性的影响因子^[17-18]等方面。白刺沙包作为我国西北干旱荒漠区典型且比较完整的植被单元,对其土壤水分变化特征已有一些研究^[19-20],但都是针对不同演替阶段的白刺沙堆开展的。关于不同降雨量对同一白刺沙包土壤水分补给差异缺乏对比研究;而且不同降雨事件,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。

由于干旱区降雨稀少,1 年内无法采集到不同量级的降雨事件,本研究通过对乌兰布和沙漠白刺沙包浅层土壤水分进行连续 3 年监测,分析植被生长季不同深度土层对不同降雨量的响应及整个生长季的土壤水分动态特征,以期为荒漠植被的发展和土壤水分承载力间平衡关系的判定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县,中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二实验场,地理位置为 106°43' E, 40°24' N, 海拔约 1050 m。该区位于乌兰布和沙漠东北部,属于温带大陆性干旱气候,年平均气温 7.8℃,多年平均降水量约 145 mm,降雨主要集中在 6—9 月份,约占全年降水的 70%—80%,年蒸发量约 2327 mm,无霜期 136 d,土壤类型为风沙土。植被类型属于温带灌木荒漠,唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)是研究地点的优势植物,能够阻挡风沙并形成白刺灌丛沙包,沙包高约 1—3 m,直径约 6—10 m,植被盖度约为 45%—75%,伴生种有沙鞭(*Psammochloa villosa*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等。群落盖度为 20%—30%。

1.2 仪器安装

选择研究区域内处于稳定阶段的典型白刺沙包(表 1),在沙包迎风坡中部分别安装 AR5 土壤水分自动测量系统(AR-5-SE, Avalon, USA)。AR5 土壤水分自动测量系统使用 EC-5 水分传感器,EC-5 土壤水分传感器(ECH₂O EC-5 Moisture Sensor)是美国 Decagon 公司(Decagon Devices Inc., Pullman, WA)研制的一种新型土壤水分监测仪器。国内外的一些应用表明 EC-5 土壤水分传感器在获取连续的土壤水分数据方面具有较好的效果^[21-23]。本研究采用 AR5 数据采集器为 EC-5 供电和存储数据。土壤水分传感器的安放深度分别是 10、20、30、40 cm 和 50 cm,不同层次土壤水分传感器上下垂直排布,以观察降雨的垂直入渗,土壤水分数据读取时间间隔为 10 min,仪器于 2014 年 5 月安装,为减少安放仪器时土壤扰动对测量准度的影响,分析使用 2015—2017 年 5 月至 9 月整个生长季的土壤水分数据。

1.3 数据分析

利用研究区附近自动气象站记录 2015—2017 年的降雨数据,分析研究区的降雨变化特征。利用 Excel

2010、SigmaPlot 10.0 对相关数据进行处理分析及制图。

表 1 白刺沙包基本特征
Table 1 Basic characteristics of *Nitraria tangutorum nebkha*

沙包形态 Shape	高度/m Height	大小/(m×m) Size	植被盖度/% Coverage	迎风坡坡度/° Windward slope	结皮类型 Crust type	结皮厚度/cm Crust thickness
半椭球体 Semi-ellipsoid	2.9	8.5×9.4	55	28	生物结皮 Biological crust	0.3—0.5

2 结果与分析

2.1 研究区 2015—2017 年生长季降雨变化特征

对研究区 2015—2017 年降雨资料进行统计,3 年生长季(5—9 月)降雨量分别为:46.2、167.2 mm 和 54.5 mm。从图 1 可知,降雨在各月份的分配差异较大,主要集中在 6—9 月份,其中除 9 月外,2016 年各月降雨量均高于 2015 年和 2017 年。

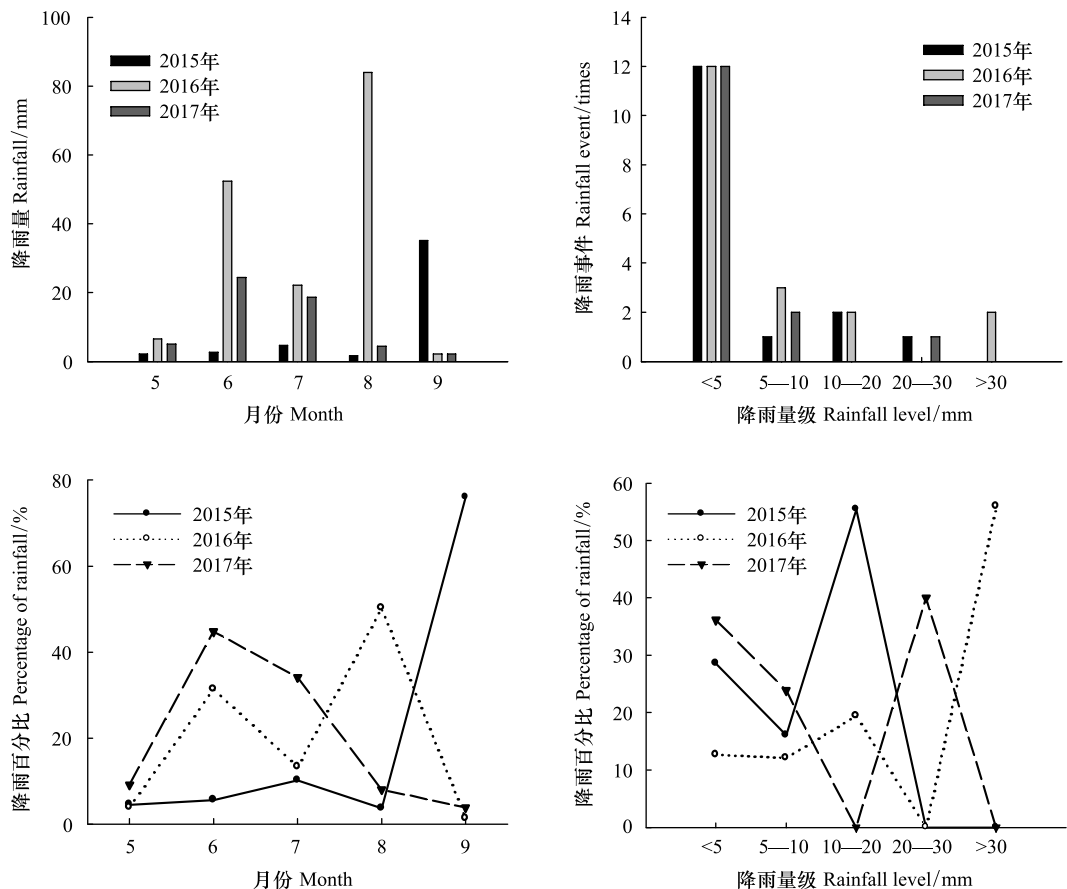


图 1 研究区 2015—2017 年生长季降水变化特征

Fig.1 Characteristics of rainfall variation in the growing season of the study area from 2015 to 2017

从降雨量级来看,最小单次降雨量为 0.1 mm,最大单次降雨量为 48.8 mm。0—5 mm 降雨量的频次最大,2015、2016 和 2017 年均为 12 次,占总降雨次数的 72%,累计降雨量 54 mm,占总降雨量的 20.2%。降雨量介于 5—10 mm 的降雨事件共发生 6 次,占总降雨次数的 12%,累计降雨量 40.6 mm,占总降雨量的 15.2%。降雨量介于 10—20 mm 的降雨事件共发生 4 次,占总降雨次数的 8%,累计降雨量 58 mm,占总降雨量的 21.6%。降雨量介于 20—30 mm 的降雨事件共发生 2 次,占总降雨次数的 4%,累计降雨量 47.6 mm,占总降雨量的 18.2%。

1%。降雨量大于 30 mm 的降雨事件共发生 2 次, 占总降雨次数的 4%, 累计降雨量 93.5 mm, 占总降雨量的 34.9%。

2.2 白刺沙包浅层土壤水分动态

从图 2 可以看出: 白刺生长季沙包浅层土壤水分变化大致可以分为两个阶段: ①土壤水分恢复期(5 月初—6 月初), 随着气温的升高, 早春积雪融化, 土壤解冻, 同时在这个时期还有少量的降雨, 使土壤含水量维持在 5%—11%。②土壤水分波动期(6 月中旬—9 月底), 6 月份以后降雨增多, 在较大的降雨或连续降雨的条件下, 不同深度的土壤含水量波动存在差异, 表层土壤水分表现为骤升骤降的脉冲式特点, 由于表层(0—10 cm)和 10—20 cm 土层土壤水分渗透很快, 在短时间内迅速升至 10%—15%, 而后耗于土壤蒸发和植物蒸腾, 逐渐降至 5%; 20 cm 以下土层土壤水分下渗缓慢, 波动相对较小, 较长时间维持在 3%—8% 左右。由此可以认为浅层土壤水分动态变化主要因大气降雨的季节分布而变化, 即白刺沙包浅层土壤水分的变化与生长季降雨变化同步。

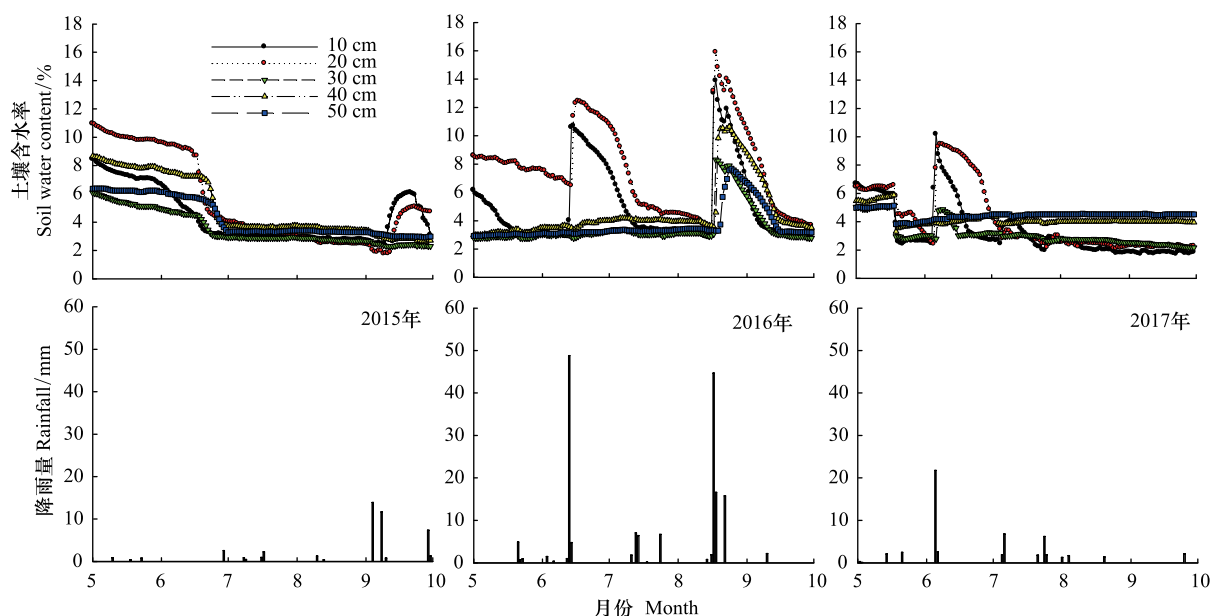


图 2 2015—2017 年白刺生长季沙包土壤水分动态

Fig.2 Soil water content dynamics of nebkha in the growth season of *Nitraria tangutorum* in 2015—2017

2.3 不同降雨量前后不同土层深度水分变化特征

图 3 表明, 5 mm 的降雨只对 0—10 cm 土层土壤水分产生影响, 使 0—10 cm 土层土壤水分提高 24.5%; 15.4 mm 的降雨对 20 cm 以上土层土壤水分产生影响, 分别使 0—10、10—20 cm 土层土壤水分提高 247.4% 和 41.8%; 21.3 mm 的降雨主要影响 30 cm 以上土层土壤水分, 分别使 0—10、10—20、20—30 cm 土层土壤水分提高 220.9%、132.1% 和 53.1%; 26.3 mm 的降雨改变了 40 cm 以上土层土壤水分, 分别使 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 土层土壤水分提高 104.4%、60.6%、115.5% 和 188.2%; 44.7 mm 的降雨(降雨时间为 10 h)对 50 cm 以上土层土壤水分均产生影响, 分别使各土层土壤水分提高 153.9%、120.8%、245.3%、453.2% 和 132.7%; 但是, 48.8 mm 的降雨(降雨时间为 2 h)只对 20 cm 以上土层土壤水分产生影响, 分别使 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤水分提高 230.2% 和 61.8%。

2.4 不同深度土层对不同降雨量的响应时间

由表 2 可以看出, 白刺沙包不同深度土层对不同降雨量的响应时间存在差异。对于 10 cm 土层而言, 除 5 mm 的降雨外, 其他降雨事件响应时间均为 0.5 h, 说明表层土壤在发生降雨后快速完成响应。对于 10 cm 以下土层而言, 随着降雨量的增大, 土壤水分发生变化的响应时间逐渐变短。白刺沙包土壤在不同降雨量影响

下,10、20、30、40 cm 和 50 cm 土层土壤水分变化的最快响应时间分别为 0.5、1、1、1.5 h 和 5 h。

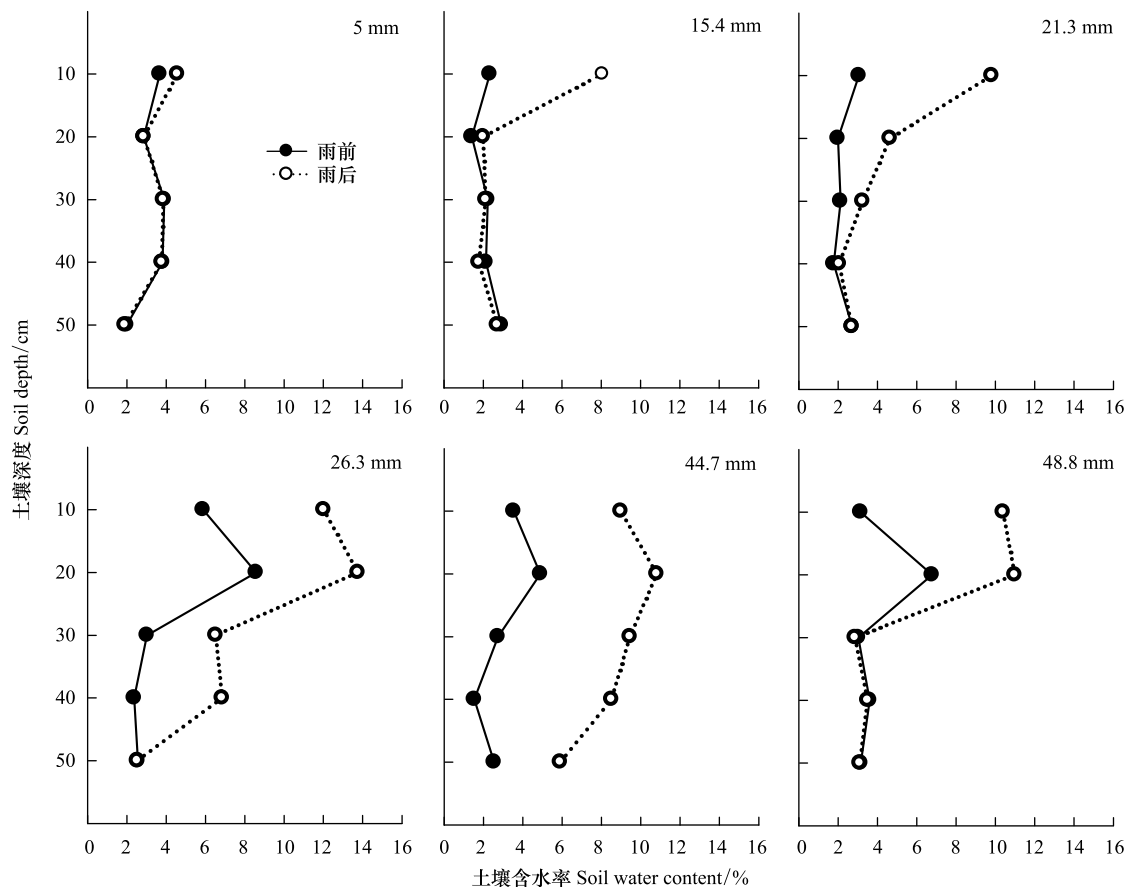


图 3 不同降雨量前后不同土层水分变化特征

Fig.3 Characteristics of water changes in different soil layers before and after different rainfall

表 2 不同深度土层对不同降雨量的响应时间

Table 2 Response time of different depth soil layers to different rainfall

土层深度 Soil depth/cm	对不同降雨量的响应时间 Response time to different rainfall/h					
	5mm	15.4mm	21.3mm	26.3mm	44.7mm	48.8mm
10	3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20		6	5.5	5	1	1
30			20	7.5	1	
40				10	1.5	
50					5	

3 讨论

3.1 不同降雨量对土壤水分含量的影响

在白刺生长季内,白刺灌丛沙包的表层(10 cm)和10—20 cm 土层土壤含水量波动剧烈,特别是生长季中期大雨(>30 mm)过后可以增加到10%—15%;而30—50 cm 土壤含水量则相对比较稳定,一直在3%—8%之间波动。降雨后表层土壤的含水量得到明显改善,而土壤30—50 cm 的含水量增幅相对较小。降雨量越大,对土壤水分的影响深度越大。例如,44.7 mm 的降雨能够明显增加0—50 cm 土层的土壤含水量,而5 mm 的降雨只能增加10 cm 土层的土壤含水量。有研究表明,2007年8月甘肃民勤一次47.6 mm 的大雨发生后,稳定阶段白刺沙包的土壤水分最大补给深度仅为30 cm^[19],比本研究的稳定阶段白刺沙包土壤水分影响深度

低。魏雅芬等^[24]在库布齐沙漠研究发现 5 mm 以下的降水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 mm 以上的降水能有效补充土壤水分。在毛乌素沙地的研究表明:大于 15 mm 的降水对土壤水分有一定的补给作用,流动沙丘土壤含水量受降雨影响较大,其中 30 cm 以上土壤水分波动剧烈,60 cm 土壤水分主要受大于 30 mm 降雨影响且波动较小^[25]。刘冰等^[26]在黑河地区研究发现小于 5 mm 降水事件对浅根性植被生长与发育有重要的意义,大于 5 mm 降水事件能够有效地补充深层土壤水分;小于 20 cm 土层土壤水分对降水脉动响应较为明显。赵学勇等^[27]运用地统计学方法在科尔沁沙区研究发现一定强度的降水在短期内只能使表层土壤水分的空间变异性减弱,而对土壤深层的水分补充和影响有限。科尔沁沙地一次 42 mm 降雨之后,小叶锦鸡儿灌丛下的土壤水分会随着蒸发而逐渐减少,表层(0—20 cm)的水分减少最快^[28]。这些研究结论与本研究结果基本一致,表明表层土壤水分受降雨量影响最明显,20 cm 以下土层土壤水分只有在发生大于 20 mm 的降雨量后才会产生波动。

此外,2015 年 6 月份土壤水分大幅降低的原因有两方面,一方面是 6 月白刺进入生长旺盛期(开花结实期),植物需水量大,对土壤水分的消耗量较大,消耗了较多土壤水分;另一方面是这个时期蒸发强烈,降雨稀少,白刺沙包土壤水分没有补给来源,因此造成土壤水分大幅度降低。

3.2 不同降雨强度对土壤水分入渗深度的影响

土壤水分入渗深度除了与降雨量大小有关外,还与降雨强度、历时有关,降雨强度越大,降雨入渗速率随降雨时间的衰减速度越快^[29]。本研究结果显示,2016 年两次降雨量相近的降雨事件(44.7 mm 和 48.8 mm)对沙包土壤水分的影响深度有明显差异,44.7 mm 的降雨对沙包土壤含水量的影响深度达 50 cm,而 48.8 mm 的降雨只影响了 0—20 cm 土层的土壤水分,这是由于二者的降雨强度不同造成的。干旱地区以超渗产流为主,当降雨强度大于土壤入渗率时形成地表径流,当降雨入渗转化为土壤水分后在一定坡度下形成壤中流^[30]。通过查阅 2016 年降雨资料可知,44.7 mm 的降雨时间为 10 h,降雨强度为:4.47 mm/h,而 48.8 mm 的降雨时间为 2 h,降雨强度为:24.4 mm/h。48.8 mm 的降雨下渗较浅原因在于稳定阶段白刺沙包土壤表层结皮分布较多,且沙包表面有一定坡度,短时间内高强度的降雨容易产生径流,减少了土壤水分垂直入渗,同时稳定阶段植被盖度较大,出现灌层截留,导致降雨出现再分配^[31]。

3.3 降雨格局变化对荒漠植被生长的影响

研究干旱区荒漠植被土壤水分分布及其对降雨格局变化的响应可为植被的发展和土壤水分承载力间平衡关系的判定提供科学依据^[32],这也是荒漠生态系统维持稳定和植被恢复与重建研究中亟需解决的关键问题^[33]。就研究区而言,15.4 mm 及以下降雨量只能补给 20 cm 以上土壤水分,而较大的降雨量(>20 mm)对深层土壤水分(20 cm 以下)的补给非常重要。从降雨频次上来看,研究区小于 5 mm 的降雨事件最多,占有降雨事件的 72%,小于 20 mm 的降雨事件占到 94%,20 mm 及以上的降雨事件仅占 6%,由于小于 20 mm 的降雨事件只能补给 20 cm 以上土壤水分,所以研究区降雨格局的变化将严重影响土壤水分状况,在降雨总量不变的情况下,多次少量(<5 mm)的降雨有利于浅根系草本植物的生长发育,而少次大量(>20 mm)的降雨则更有利于深根系灌木的生存,这与 Ram and Aaron^[34]和 Li^[35]的研究结论一致。Berndtsson 等^[36]研究也发现,小降雨事件能有效地恢复表层土壤水,因此浅根植物受益;而较大的降雨有利于深层土壤水分的恢复,对深根系植物有利。因此,在研究区降雨事件以小于 20 mm 降雨为主的情况下,导致 20 cm 以下土壤水分逐步恶化,久之将有利于浅根系草本植物的生长,而白刺群落根系主要分布在 30 cm 以下,利用 30—60 cm 土层土壤水分^[37],长期水分供给不足会导致白刺群落的衰退,研究区这种降雨格局将对浅层土壤水分及植被演替产生重要影响。

4 结论

(1)在乌兰布和沙区,<10 mm 的降雨只能对 0—10 cm 土层白刺沙包土壤水分产生影响,10—20 mm 的降雨可以对 0—20 cm 土层的白刺沙包土壤水分产生影响,20—30 mm 降雨能够对 0—30 cm 土层土壤水分产

生影响,>30 mm 的降雨可以影响到 0—50 cm 土层(甚至更深)的土壤水分。

(2)研究区地下水位在 5 m 以下,对沙包土壤水分的补给非常有限,因此天然降雨是土壤水分的最重要补给源。白刺沙包土壤水分动态受降雨事件的影响较大,10 cm 土层土壤水分受降雨的影响最为明显,土壤水分含量变化剧烈,较大降雨事件(降雨量大于 20 mm)后土壤水分含量能迅速达到 15%左右,而后又逐渐下降到 5%左右。

(3)白刺沙包土壤在不同降雨量影响下,10、20、30、40 cm 和 50 cm 土层土壤水分变化的最快响应时间分别为 0.5、1、1、1.5 h 和 5 h。

参考文献(References):

- [1] Smith S D, Nowak R S. Ecophysiology of plants in the intermountain lowlands//Osmond C B, Hidy G M, Pitelka L F, eds. Plant Biology of the Basin and Range. Berlin Heidelberg: Springer, 1990.
- [2] 邱扬,傅伯杰,王军,张希来,孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.
- [3] Stocker T, Plattner G K, Dahe Q. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis-Findings and Lessons Learned[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [4] Allen S K, Plattner G K, Nauels A. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [5] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Productivity responses to altered rainfall patterns in a C₄-dominated grassland. Oecologia, 2003, 137(2): 245-251.
- [6] 潘颜霞,王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析. 中国沙漠, 2007, 27(2): 250-256.
- [7] 马海艳,龚家栋,王根绪,程国栋. 干旱区不同荒漠植被土壤水分的时空变化特征分析. 水土保持研究, 2005, 12(6): 231-234.
- [8] 张浩,王新平,张亚峰,虎瑞,潘颜霞,陈宁. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1847-1853.
- [9] 徐先英,严平,郭树江,柴成武. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [10] Matsui T, Omasa K, Horie T. The Difference in Sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. Plant Production Science, 2001, 4(2): 90-93.
- [11] 王新平,康尔泗,李新荣,张景光. 荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响. 地球科学进展, 2003, 18(4): 592-596.
- [12] 张志玲,范昊明,郭成久,武敏,李洪丽,韩英. 模拟降雨条件下坡面水流流速与径流输出特征研究. 水土保持研究, 2008, 15(6): 32-34.
- [13] 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.
- [14] 朱海. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落土壤水分动态[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [15] 于晓娜,李恩贵,黄永梅,李小雁. 毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)群落土壤水分动态特征. 中国沙漠, 2015, 35(3): 674-682.
- [16] 王新平,李新荣,康尔泗,张景光,周海燕,杨诗秀,雷志栋. 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. 生态学报, 2003, 23(6): 1234-1241.
- [17] 孙飞达,陈文业,袁海峰,窦英杰,祁丹琿,冯颖,吴婷. 甘肃敦煌西湖荒漠——湿地生态系统土壤水分空间异质性及其影响因子研究. 西北植物学报, 2016, 36(1): 165-173.
- [18] 马风云,李新荣,张景光,李爱霞. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.
- [19] 杜建会,严平,俄有浩,韩富贵. 强降雨事件对不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤水分的影响. 水土保持通报, 2007, 27(6): 20-24.
- [20] 席军强,赵翠莲,杨自辉,郭树江,王强强,张剑挥. 荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤水分空间分布及入渗特征. 草业学报, 2016, 25(11): 15-24.
- [21] Bogaen H R, Huisman J A, Oberdörster C, Vereecken H. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology, 2007, 344(1/2): 32-42.
- [22] Loden P, Han Q, Porta L, Illangasekare T, Jayasumana A P. A wireless sensor system for validation of real-time automatic calibration of groundwater transport models. Journal of Systems and Software, 2009, 82(11): 1859-1868.
- [23] 何修道,王立,党宏忠,韩辉,吕文强. ECH₂O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的可靠性. 水土保持通报, 2016, 36(4): 68-71, 77-77.
- [24] 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. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [25] 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.

- [26] 刘冰, 赵文智, 常学向, 李守波. 黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应. 中国沙漠, 2011, 31(3): 716-722.
- [27] 赵学勇, 左小安, 赵哈林, 张铜会, 李玉强, 移小勇. 科尔沁不同类型沙地土壤水分在降水后的空间变异特征. 干旱区地理, 2006, 29(2): 275-281.
- [28] 王少昆, 赵学勇, 左小安, 赵玮, 郭铁瑞. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛下土壤水分对降雨响应的空间变异性. 干旱区研究, 2008, 25(3): 389-393.
- [29] 蔡进军, 张源润, 潘占兵, 董立国, 许浩, 王月玲, 季波, 马璠, 韩新生. 宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤水分的时空变异特征. 水土保持研究, 2016, 23(1): 75-79, 85-85.
- [30] Perry M A, Niemann J D. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs. Journal of Hydrology, 2007, 334(3/4): 388-404.
- [31] 王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配. 应用生态学报, 2016, 27(3): 755-760.
- [32] 朱雅娟, 吴波, 卢琦. 干旱区对降水变化响应的研究进展. 林业科学研究, 2012, 25(1): 100-106.
- [33] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [34] Ram A, Aaron Y. Negative and positive effects of topsoil biological crusts on water availability along a rainfall gradient in a sandy arid area. CATENA, 2007, 70(3): 437-442.
- [35] Li X R, He M Z, Zerbe S, Li X J, Liu L C. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(8): 932-940.
- [36] Berndtsson R, Chen H S. Variability of soil water content along a transect in a desert area. Journal of Arid Environments, 1994, 27(2): 127-139.
- [37] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 郝玉光, 张景波, 李磊, 綦艳林. 乌兰布和沙漠 5 种灌木的水分利用策略. 林业科学, 2010, 46(4): 15-21.