

巴丹吉林沙漠高大沙山怪柳地土壤水分时空动态

张进虎^{1,2}, 王乃昂¹, 牛震敏¹, 孙杰¹, 张律吕¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000;

2. 甘肃省治沙研究所/甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室培育基地, 兰州 730000)

摘要:为探索怪柳地土壤水分特征及其对降水事件的响应,采用 EM50 土壤水分检测系统及 MAWS301 自动气象站,监测了怪柳地及相似立地裸露沙山 10—210 cm 土壤体含水量动态和区域降水量,并分析了两者的土壤水分基本特征、时空动态及其对降水事件的响应。结果表明:(1) 怪柳地 10—210 cm 土壤含水量平均值为 1.88%,稍高于裸露沙山(1.74%)水分;(2) 怪柳地土壤水分呈浅层(10—70 cm)高、中层(70—150 cm)低、深层(150—210 cm)高的特点,且浅层稍低于裸露沙山水分($p>0.05$),中层相近,深层明显高于裸露沙山($p<0.01$);(3) 怪柳地各层次水分变异大,对极端降水事件敏感,平均变异率 58.67%,是裸露沙山的 4.26 倍,降水入渗可达 200 cm,而沙山不超 60 cm。怪柳林地水分主要受降水影响,且怪柳的存在改变了降水再分配过程,促进了降水入渗的深度,使林地维持较高的含水量。

关键词:高大沙山; 短穗怪柳; 土壤水分; 巴丹吉林沙漠

中图分类号:S793.5; S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0092-06

Spatiotemporal Dynamics of Soil Moisture of *Tamarix laxa* Land in the Mega-dunes of Badain Jaran Desert

ZHANG Jinhui^{1,2}, WANG Naiang¹, NIU Zhenmin¹, SUN Jie¹, ZHANG Lülü¹

(1. College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Gansu Desertification and

Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to explore the soil water characteristics and the response to extreme precipitation events, we used EM50 to monitor the 10—210 cm soil moisture dynamics of woodland and similar sites bare sand, and used MAWS301 automatic weather station to monitor regional precipitation. The basic characteristics, temporal and spatial dynamics of soil moisture and their response to precipitation had been analyzed. The results showed that: (1) the average soil moisture of *Tamarix laxa* land (10—210 cm) was 1.88%, which is slightly higher than that of bare sand (1.74%); (2) the soil water content of *Tamarix laxa* land was characterized as the high content in shallow layer (10—70 cm), low content in middle layer (70—150 cm) and high content in deep layer (150—210 cm), and the shallow layer was slightly lower ($p>0.05$), the middle layer was similar and the deep layer was significantly higher ($p<0.01$) compared with the bare sand; (3) the soil water of *Tamarix laxa* land had bigger variability and was sensitive to extreme precipitation events. The average soil moisture variability is 58.67%, which was 4.26 times higher than the sand; the precipitation infiltration was up to 200 cm in *Tamarix laxa* land, while it was less than 60 cm in the bare sand. The soil moisture of *Tamarix laxa* land was mainly affected by precipitation, moreover, the precipitation redistribution process was changed by *Tamarix laxa*, which promoted the depth of precipitation infiltration, and kept the higher soil moisture.

Keywords: mega-dunes; *Tamarix laxa*; soil moisture; Badain Jaran Desert

土壤水分在干旱区生态水文过程中扮演着重要的角色,是关键生态限制因子。它联系着地下水、地表水及大气降水,制约着干旱沙漠区植被的形成和发展,是土地沙漠化的主要调控者^[1-4],其含量及动态变化决定着沙漠化的发展或逆转。在地下水埋深较深的干旱区,大气降水是土壤水分最主要来源^[5]。沙漠地区气候干旱,风沙活动频繁剧烈,仅有少数耐旱、耐风蚀、耐沙埋的物种可以生存和发展,且以草本或灌木为主,如白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)等。笔者在考察巴丹吉林沙漠时发现,在巴丹吉林沙漠东南部相对高度 166~300 m 的高大沙山的背风坡中上部有短穗怪柳(*Tamarix laxa*)分布,平均株高、地径、冠幅分别可达 3.34 m, 6.30 cm, 9.9 m×10.06 m。而一般情况下,在沙源丰富的地区,怪柳常形成怪柳沙包,枝条被沙埋,丛状生长,与之相比,巴丹吉林高大沙山怪柳显得形体高大,主干明显,如同“乔木化”生长(图 1)。然而,当地年降水量仅为 90.1~115.4 mm^[6],在如此高大的沙山中上部土壤水分是如何维持怪柳生物量的呢?



巴丹吉林沙漠怪柳

民勤绿洲边缘怪柳沙包

图 1 巴丹吉林沙漠与民勤绿洲边缘怪柳生长状态对比

巴丹吉林沙漠位于阿拉善高原西部,范围为合黎山、北大山以北,拐子湖、古居延泽以南,雅布赖山之西北,黑河正义峡出山口、弱水东岸至古日乃湖以东,面积 5.2 万 km²,系我国第二大沙漠^[7]。东西长约 442 km,南北宽约 345 km,地势呈东南高,西北低,平均海拔 1 200~1 700 m。沙山高差大多在 200~300 m,最大高差接近 500 m,是世界上高差最大沙山分布区^[8]。巴丹吉林沙漠属于温带极端干旱气候,降水稀少,年均降水量为 76.9 mm。东南部降水较多,年均降水量为 90.1~115.4 mm。冬季平均气温-9.1℃,夏季平均气温 25.3℃^[9]。潜在蒸发量>2 000 mm。常见植物种有白刺、霸王、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、沙米、沙拐枣、碟果虫实(*Corispermum patelli forme*)等。

巴丹吉林沙漠分布着全球最高的沙山及 110 个常年积水湖泊及若干个季节湖泊及干涸湖盆^[10]。奇特的自然景观吸引了众多的研究者,其中沙山形成演

化、湖泊水来源及湖泊—沙山水循环成为研究的焦点^[11-17]。高大沙山水分特征,来源及沙山—湖泊水分转化关系也得到众多学者的关注,但研究结果存在争论。主要表现为:(1)沙山水分含量及来源的争论。有人认为沙山体积含水量约 3%,达到了最大持水量的 65% 或者更高,不是当地降水的产物,还有其他水源补给^[19]。与之相一致的结果有湖泊水汽凝结^[20]及地下水上升补给沙山水分^[15];有人却认为沙山水分含量一般小于 2%,是当地降水的产物^[20]。(2)降水入渗的争论。有人认为当地降水可入渗通过沙山补给湖泊或地下水^[20],而有些人认为降水在沙山的入渗深度有限,对地下水没有明显补给作用^[17,9]。(3)极端降水事件对沙山水分有深刻影响^[11],但现有研究主要以稳定同位素、涡动相关等间接手段为主,缺乏降水入渗过程的连续实测资料,难以直接判断降水能否通过沙山入渗补给地下水或者湖泊水。本研究采用先进的土壤水分监测系统,以怪柳地为突破口,以裸露沙山为对照,研究两者的土壤水分基本特征、时空动态及其对极端降水的响应过程,旨在揭示高大沙山怪柳水分维持机制,完善沙山—湖泊水循环研究。

1 试验材料与方法

以扎拉特东沙山背风坡怪柳(P₁)为研究对象,以查行陶勒图东面裸露沙山(P₂)为对照。两沙山直线距离约 4.45 km,立地相似,具有可比性。P₁ 平均坡度 26°,海拔 1 398 m, P₂ 平均坡度 24°,海拔 1 436 m (表 1)。2014 年 10 月下旬分别在 P₁ 及 P₂ 挖取土壤剖面并安装土壤水分测量系统(品牌:Decagon,型号:EM50,校准后精度±1%),回填,踩实。探头深度为 20, 40, ..., 200 cm,数据采集间隔为 0.5 h。为消除土层扰动对数据准确性的影响,分析数据采用仪器安装 10 d 后所采集的数据,即 2014 年 11 月 1 日—2015 年 10 月 30 日。每一层观测数据总计 17 520 组,整体剖面数据总计 175 200 组。土壤水分监测系统在实验室采用烘干法校正(图 2)。

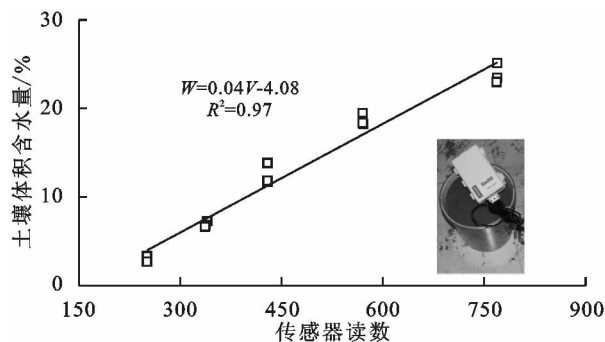


图 2 土壤水份监测系统校正曲线

降水数据用车日格勒自动气象观测系统(品牌: Vaisala, 型号: MAWS301)观测,记录间隔为 1 h。数据分析和做图分别采用 SPSS 13.0 和 OriginPro 9.0 完成。

表 1 是巴丹吉林沙漠东南部已调查 5 个样点的

柽柳形态特征及其分布地理信息。每个样点柽柳均呈“灌丛状”分布,“乔木化”生长,平均株高 3.34 m,冠幅 9.9 m×10.0 m,地径 6.3 cm。主要分布于高大沙山的背风坡,迎风坡亦见少量分布。

表 1 巴丹吉林沙漠已调查柽柳形态特征及地理信息

编号	形态特征			地理坐标		海拔/m	坡度/(°)	分布位置
	株高/m	冠幅/m×m	地径/cm	N	E			
P ₁	3.5	8×10	4.2	39°48′53.57″	102°23′36.27″	1398	25~27	背风坡
P ₂	3.3	12.5×10.8	5.82	39°46′28.26″	102°23′27.31″	1436	23~25	背风坡
P ₃	3.2	9×9.5	4.58	39°46′15.65″	102°08′20.40″	1344	20~23	背风坡
P ₄	3.5	12×15	5.16	39°36′4.26″	102°02′32.41″	1409	18~15	背风坡
P ₅	3.2	8×5	11.73	39°42′52.96″	102°18′41.54	1426	18~15	迎风坡
平均值	3.34	9.9×10.0	6.30	—	—	1403	21.33	—

2 结果与分析

2.1 土壤水分基本特征

10—210 cm 剖面平均土壤水分,最大值及变异率 P₁ 点均高于 P₂ 点。P₁ 点平均土壤水分 1.88%,高于 P₂ 点 0.06%,平均最大值为 5.06%,高于 P₂ 点 2.23%,平均变异率为 58.67%,是 P₂ 点的 4.26 倍。土壤水分平均最小值 P₁ 点低于 P₂ 点,P₁ 点平均最小值为 0.73,低于 P₂ 点 0.07%(表 2)。

表 2 土壤水分基本特征 %

样点	M _{max}	M _{min}	M _{avg}	CV
P ₁	5.06	0.73	1.88	58.67
P ₂	2.83	1.5	1.74	13.76

注:M_{max}为各层次观测最大值的平均值,M_{min}为各层次观测最小值的平均值,M_{avg}为各层次观测平均值的平均值,CV 为各层次水分变异率的平均值,下表同。

2.2 土壤水分时空动态

2.2.1 垂直动态 P₁ 点和 P₂ 点的土壤水分最大值均出现于 10—30 cm 深度土层,含水率达 2.18%和 3.24%,P₁ 点低于 P₂ 点 1.06%。土壤水分最小值 P₁ 点出现在 70—90 cm 深度土层,而 P₂ 点出现在较深的 150—170 cm 土层,含水率分别为 1.42%和 0.61%,P₁ 点高于 P₂ 点最小值 0.81%。P₁ 点 10—210 cm 土壤含水量呈不显著减小趋势($p>0.05$),而 P₂ 点从 10 cm 到 210 cm 土壤含水量呈极显著减小趋势($p<0.01$)。P₁ 点 10—70 cm 层土壤水分明显小于无植物的 P₂ 点,而深层 150—210 cm 土壤含水率(1.97%)显著高于 P₂ 点(0.92%)($p<0.01$),70—150 cm 土层两点含量接近(图 3)。

每一层次土壤水分,P₁ 点较 P₂ 点变化剧烈。P₁ 点土壤水分变异率均高于 P₂ 点对应层次。130—150 cm 深度土层变异率差异最大,P₁ 点是 P₂ 点的 12.98 倍,70—90 cm 深度土层差异最小,P₁ 点仍是 P₂ 点的 2.51 倍。土壤水分极差 P₁ 点亦高于 P₂ 点对应层

次。P₁ 点、P₂ 点极差最大值均出现在 10—30 cm 深度土层,数值分别为 5.46%,2.76%,P₁ 点是 P₂ 点的 1.98 倍。两侧点极差差异最大值出现在 190—210 cm 深度土层,相差 4.06%,最小差异出现在 70—90 cm 深度土层,相差 1.72%(表 3)。

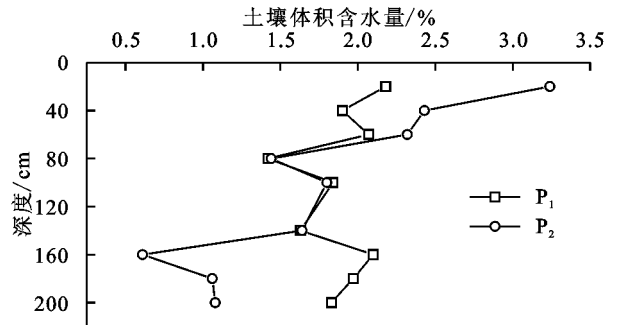


图 3 土壤水分垂直分布

2.2.2 季节动态 2014 年 11 月—2015 年 10 月降水量为 88.41 mm,主要集中在 4,7,9 月份,占总降水量的 74.2%。4,7,9 月份降水量分别为 21.05,22.06,19.2 mm,分别占总降水量的 24.32%,24.95%,21.7%。为了便于分析比较,根据每层含水率的变化特点进行合并,通过求平均值作为合并层的土壤水分,并将剖面划分为浅层(10—70 cm)、中层(70—150 cm)及深层(150—210 cm)。

浅层土壤水分与降雨密切相关,呈雨季高、旱季低的特点。4—9 月 P₁ 点和 P₂ 点土壤水分分别处于 1.23%~4.29%,2.13%~5.31%,平均值分别为 3.07%,4.09%,而其他月份 P₁ 点和 P₂ 点土壤水分分别处于 0.65%~2.89%,2.04%~3.58%,平均值分别为 1.32%,2.62%;除 4 月份外,其他月份土壤水分 P₁ 点均低于 P₂ 点;P₁ 点土壤水分峰值与降雨峰值同步变化而 P₂ 点峰值明显的滞后于降水峰值(图 4A)。中层土壤水分 P₁ 点随雨季呈波动变化,而 P₂ 点几乎不变,保持平稳。在降水较多的 4 月和 7 月份,P₁ 点土壤水分分别增加 1.57%,0.61%,且保持较

高水平,而 P_2 点增幅较小,仅有 0.01%,0.06%。在雨季, P_1 点土壤水分高于 P_2 点,而在旱季 P_1 点低于 P_2 点(图 4B)。深层土壤水分 P_1 点亦受降雨的影响,保持较高水平,而 P_2 点不受降雨影响,保持平稳; P_1 点在 11 月—翌年 3 月含量低且平稳,从降雨较多的 4 月份

开始增加,7 月达到最大值 3.32%,然后开始减小,至 10 月份降至 1.92%;而 P_2 点土壤水分变化仅为 $\pm 0.27\%$ (图 4C)。剖面整体土壤水分, P_1 点由于各层次受降雨的影响,在雨季高于 P_2 点,在旱季可能是由于蒸散较大等原因,低于 P_2 点(图 4D)。

表 3 林地不同层次土壤水分极值及变异率

深度/cm	P_1				P_2			
	M_{\max}	M_{\min}	R	CV	M_{\max}	M_{\min}	R	CV
20	6.04	0.58	5.46	51.62	5.65	2.89	2.76	15.26
40	5.97	0.86	5.11	59.62	4.88	2.19	2.69	19.74
60	5.83	1.07	4.76	59.79	4.64	2.01	2.63	23.81
80	3.17	0.54	2.63	60.09	2.12	1.21	0.91	13.17
100	5.09	0.44	4.65	49.43	2.29	1.63	0.66	5.78
140	3.94	0.58	3.36	64.5	2.05	1.49	0.56	4.97
160	5.37	1.14	4.23	52.48	0.89	0.54	0.35	8.48
180	4.74	0.58	4.16	56.18	1.49	0.61	0.88	19.63
200	5.44	0.82	4.62	74.28	1.49	0.93	0.56	13.01

注:CV=SD/ M_{avg} (SD 为各层观测值标准差), $R=M_{\max}-M_{\min}$ 。

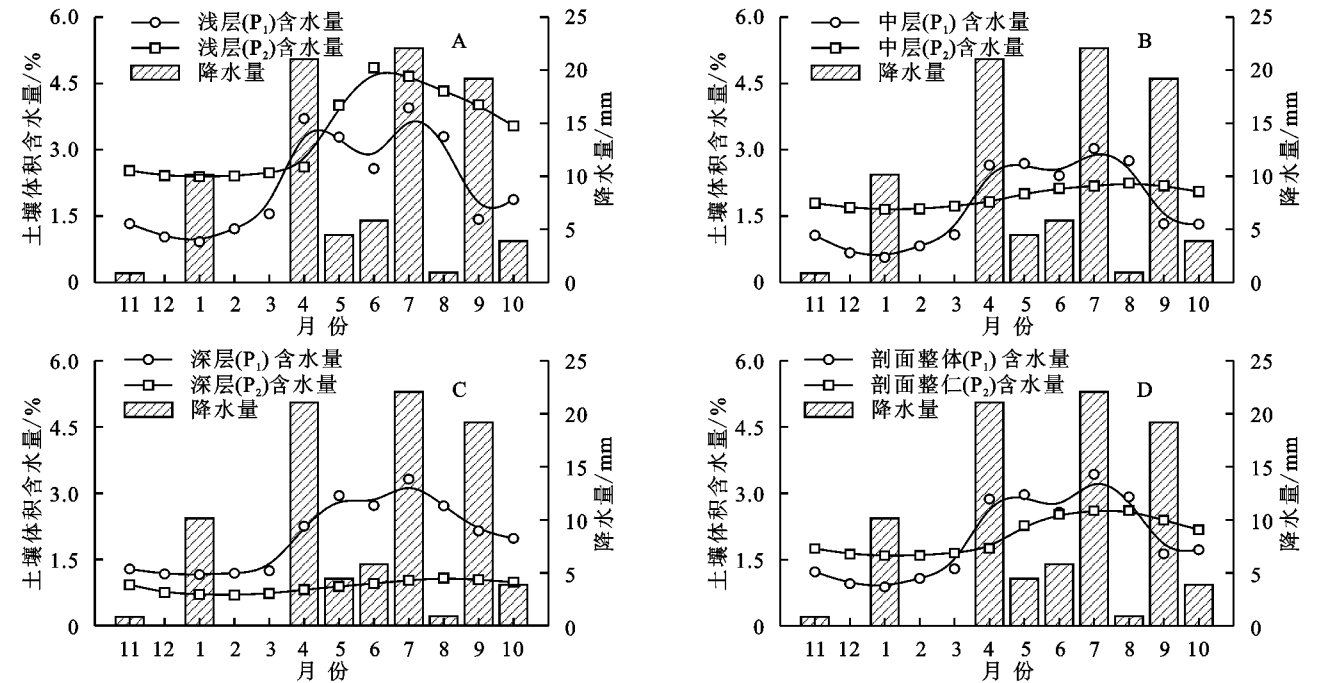


图 4 土壤水分季节动态

2.3 降水事件对土壤水分的影响

观测期共发生两次极端降雨事件,分别为 2015 年 4 月 1—3 日及 7 月 8 日,降雨量分别为 14.64,14.19 mm。两次降雨事件发生后 P_1 , P_2 点土壤水分都有所增加,但增加的幅度及所需历时差异明显(图 5)。

4 月 1—3 日降雨后, P_1 点各层次土壤水分都有明显的升高,但是升高的幅度及达到峰值所用时间不同。浅层土壤初始含水量为 1.80%,历时 8 d,达到峰值 4.82%,增幅 3.02%;中层土壤初始含水量为 1.14%,历时 9 d,达到峰值 2.94%,增幅 1.8%;深层

土壤初始含水量为 1.15%,历时 30 d,达到峰值 3.07%,增幅 1.92%。土壤水分增幅从大到小的顺序为:浅层>中层>深层,所用历时从长到短的顺序为:深层>中层>浅层。7 月 8 日降雨后,浅层土壤初始含水量为 2.89%,历时 5 d,达到峰值 5.59%,增幅 2.7%;中层土壤初始含水量为 2.31%,历时 5 d,达到峰值 3.63%,增幅 1.32%;深层土壤初始含水量为 2.28%,历时 7 d,达到峰值 5.07%,增幅 2.79%。土壤水分增幅从大到小的顺序为:深层>浅层>中层,所用历时从长到短的顺序为:深层>中层=浅层。

P_2 观测点只有浅层土壤受到降雨影响,中层和深层几乎不受降雨影响;就浅层而言,降雨事件后土壤水

分增加的幅度及历时与 P_1 点明显不同,呈增幅小,历时长长的特点。

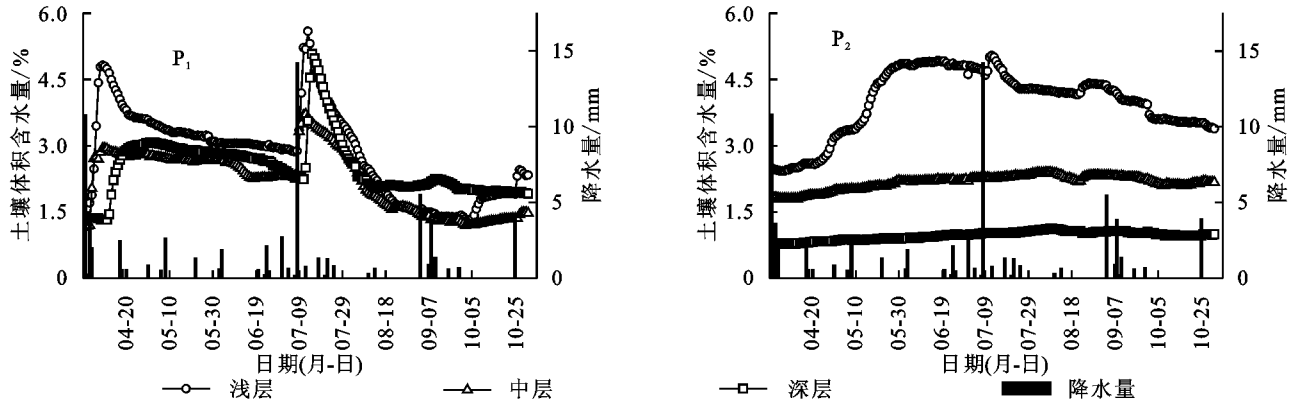


图5 2015年降水事件与土壤水分日变化过程

2.4 讨论

怪柳是我国干旱及半干旱区广泛分布的物种之一,具有耐干旱、耐盐碱、耐贫瘠、耐风蚀和沙埋的特点,是一种优良的防风固沙植物,同时也是水土保持和盐碱地改良的树种。怪柳根系发达,主要依靠地下水生存,是典型的地下水湿生植物^[21-22]。在巴丹吉林沙漠高大沙山的中上部发现怪柳实属奇特现象。

本研究显示,巴丹吉林沙漠高大沙山怪柳林地(10—210 cm 土层)平均含水量为 1.88%,略高于裸露沙山水分 0.14%,与赵景波等^[20]的研究结果相近,符合区域气候特征。但怪柳林地土壤水分随深度增加呈波动变化,不呈线性减小趋势,而裸露沙山土壤水分随深度呈线性减小趋势。这与人研究的水分随深度增加而增加的变化规律不一致^[5]。深层土壤水分平均值为 1.96%,高于沙山水分 1.05%,最高可达 5.44%,这与顾慰祖等^[18]发现的沙山高孔隙水现象具有相似之处。每一层次怪柳林地水分变异大,平均变异率 58.67%,是沙山平均水分变异率的 4.26 倍。也就是说怪柳林地水分受外界降雨影响更为敏感,在雨季水分大幅度升高,而在旱季由于强烈的蒸发而快速下降。例如,在降水较多的 4 月份,怪柳林地水分最大值可达 5.44%,而沙山为 4.47%;林地水分平均值为 2.87%,而沙山仅为 1.75%。在降水稀少,蒸发强烈的 8 月份,怪柳林地水分最低可达 0.54%,而沙山为 0.79%;林地水分平均值为 2.0%,而沙山为 2.4%。

怪柳林地水分变化与降水变化具有较好的一致性。在雨季呈林地水分增加且维持较高水平,而在旱季水分呈下降,维持较低水平。这与人对沙地水分特征研究结果相似^[23-24]。但是林地水分对降水影响敏感,变异大,且深层土壤水分高等结果与前人的研究不一致^[5,16,24]。林地水分的敏感性,特别是深层较

高的含水量可能与树冠径流等有关。王正宁等^[26]对柠条、沙蒿树干径流及土壤入渗的研究表明,荒漠灌丛可改变降水在灌丛内的水平空间分布,进而影响植被冠层下土壤水分的空间响应,使降水汇集于主干,集中入渗,增加了降水入渗量和深度。巴丹吉林沙漠高大沙山怪柳主干明显,呈灌丛生长,满足树干径流的形成条件,据调查,沙山怪柳的根系主要分布在 0—90 cm 土层,90 cm 以下土层根系分布少,呈枯死状态,大大减小了对土壤水分的吸取,这种“高汇水”“低耗水”的特征,有可能促使深层较高的土壤水分的形成。在降雨事件过程中或者结束后的一定时间,土壤水分主要以重力水的形式向下运移。在运移的过程中重力水被土层不断吸收储存,传到的水分越来越少,直到停止运移。因此,随着土层变深,土壤水分补给的就越少,达到的峰值越低。但在 7 月 8 日的降雨事件后,浅层和深层土壤水分都迅速增加,达到了峰值,但是中层土壤水分峰值(3.71%)不但小于浅层的峰值(5.59%)而且小于深层(5.07%)(图 5)。由此,可以推断深层水分虽然较大幅度的升高了,但是升高的原因不可能为降雨的入渗,可能别有源头。

3 结论

巴丹吉林沙漠高大沙山怪柳地土壤水分高于裸露沙山水分,且呈浅层及深层高而中层低的特点。浅层土壤水分怪柳地低于沙山水分对应层次水分,中层两者水分相近,深层怪柳地水分显著高于裸露沙山水分。怪柳林地水分变异大,对较大降水事件敏感,入渗快而深,而裸露沙山土壤水分变小,仅有浅层土壤受到降雨的影响,中层和深层几乎稳定不变。

高大沙山怪柳的存在可能是区域降水—沙山—湖泊水循环研究的一个新突破口。本研究认为怪柳

地土壤水分高于裸露沙山,对降雨事件敏感,并且怪柳的存在改变了降水再分配过程,增加了降水的入渗,维持了林地较高的土壤含水量。林地深层土壤水分来源,还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李小雁. 干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [2] 刘昊, 周宏飞, 刘翔. 强降雨条件下沙丘土壤水分运移特征分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 157-162.
- [3] 冯伟, 杨文斌, 党宏忠, 等. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 400-406.
- [4] Dong Chunyu, Wang Nai'ang, Chen Jiansheng, et al. New observational and experimental evidence for the recharge mechanism of the lake group in the Alxa Desert, north central China[J]. Journal of Arid Environments, 2016, 124: 48-61.
- [5] 杨文斌, 唐进年, 梁海荣, 等. 我国典型沙漠(地)流动风沙土的深层渗漏量及动态变化[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(9): 2052-2061.
- [6] 马宁, 王乃昂, 朱金峰, 等. 巴丹吉林沙漠周边地区近 50 a 来气候变化[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1541-1547.
- [7] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [8] 马延东, 赵景波, 罗小庆, 等. 巴丹吉林沙漠沙山区径流与地下水补给条件[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 433-448.
- [9] Ma Ning, Wang Nai'ang, Zhao Liqiang, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran Desert, China[J]. Chin. Sci. Bull., 2014, 59(2): 162-170.
- [10] Wang Nai'ang, Ning Kai, Li Zhuolun, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China: Earth Sciences, 2016, 46(8): 1106-1115.
- [11] Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Lü Ping, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. Earth Science Reviews, 2013, 120: 20-39.
- [12] 杨小平. 近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 428-433.
- [13] Yang Xiaoping. Chemistry and late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, western Inner Mongolia, China[J]. Catena, 2006, 66: 135-144.
- [14] 陈建生, 凡哲超, 汪集旸, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析[J]. 地球学报, 2003, 24(6): 497-504.
- [15] Chen Jiansheng, Li Ling, Wang Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432: 459-460.
- [16] 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2789-2796.
- [17] 陈建生, 陈茜茜, 王婷. 阿拉善沙漠湿沙层水分来源同位素示踪[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 196-206.
- [18] 顾慰祖, 陈建生, 汪集旸, 等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 695-699.
- [19] Wen Jun, Su Zhongbo, Zhang Tangtang, et al. New evidence for the links between the local water cycle and the underground wet sand layer of a mega-dune in the Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 371-377.
- [20] 赵景波, 邵天杰, 候雨乐, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 694-702.
- [21] Gries D, Zeng F, Foetzki A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima*, and *Populus euphratica*, on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table[J]. Plant Cell & Environment, 2003, 26(5): 725-736.
- [22] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游怪柳根系水力提升对林分蒸散的贡献[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 1-9.
- [23] 原鹏飞. 盐池沙地水分动态与干沙层形成规律研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [24] 张进虎, 贺康宁, 段玉玺, 等. 毛乌素沙地西南缘不同植被下的土壤水分时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2008, 14(4): 377-380.
- [25] 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.
- [26] 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.