DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.02.009
文献引用：张进虎，牛震敏，马曙光，等．巴丹吉林沙漠高大沙山短穗柽柳分布区水分特征及其水文指示意义[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（2）：53-59. ZHANG J H，NIU Z M，MA S G，et al. Water characteristics and hydrological significance of *Tamarix laxa* distribution in the Mega Dune of Badain Jaran Desert[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（2）：53-59.

巴丹吉林沙漠高大沙山短穗柽柳分布区水分特征及其水文指示意义*

张进虎[1,2,3,4]，牛震敏[3]，马曙光[1,2]，孙　杰[3]，王乃昂[3**]

（1. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海　西宁　810008；2. 青海师范大学地理学科学院青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海　西宁　810008；3. 兰州大学资源环境学院/兰州大学冰川与沙漠研究中心，甘肃　兰州　730000；4. 青海省人民政府北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海　西宁　810008）

摘要：巴丹吉林沙漠湖泊群及其补给来源是热点研究问题。沙山是联系大气降水和湖泊水的纽带，研究其水文特征可加深认识区域湖泊水循环，而植物分布对沙山水文特征具有重要的指示意义。本文以短穗柽柳（*Tamarix laxa*）所在的高大沙山背风坡土壤为研究对象，采用烘干法测定了短穗柽柳分布区土壤含水量，分析了其时空变化特征，探讨其对高大沙山水文特征的指示意义。结果显示：短穗柽柳分布区土壤剖面按其水分特征可划分为水分速变层（0~60 cm）、水分活跃层（60~120 cm）及水分相对稳定层（120~200 cm），含水量随深度增加呈减小趋势，速变层平均含水量为1.69%，显著高于其他2层；95.83%短穗柽柳分布区含水量处于0.50%~3.00%，且观测最大值为4.88%，均小于沙山田间持水量（5.00%），说明短穗柽柳分布区难以存在重力水，指示高大沙山背风坡降水难以形成重力水快速下渗补给湖泊水；短穗柽柳的“乔木化”生长特征及其特殊的分布位置，不仅有利于其根叶繁殖，还有利于对水分的储存和保持，维持着短穗柽柳的生存和发展。

关键词：高大沙山；短穗柽柳；水分特征；巴丹吉林沙漠
中图分类号：P933　　**文献标识码**：A

Water characteristics and hydrological significance of *Tamarix laxa* distribution in the Mega Dune of Badain Jaran Desert*

ZHANG Jinhu[1,2,3,4]，NIU Zhenmin[3]，MA Shuguang[1,2]，SUN Jie[3]，WANG Nai'ang[3**]

（1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation （Ministry of Education），Qinghai Normal University，Xining Qinghai　810008；2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process，College of Geographical Science，Qinghai Normal University，Xining Qinghai　810008；3. College of Earth and Environmental Sciences，Center for Glacier and Desert Research，Scientific Observing Station for Desert and Glacier，Lanzhou University，Lanzhou Gansu　730000；4. Academy of Plateau Science and

收稿日期：2021-10-18
* 国家自然科学基金项目（41871021）；青海省高端创新人才千人计划项目（青人才字[2019]6号）；青海省创新平台建设专项青海省自然地理与环境过程重点实验室项目（2020-ZJ-Y06）
** 通信作者：wangna@lzu.edu.cn

Sustainability, People's Government of Qinghai and Beijing Normal University,
Xining Qinghai 810008)

Abstract: Lake Group of Badain Jaran Desert and the recharge sources are hot issues in the academic community. The Mega Dune links the atmospheric precipitation and the lake water. Studying its hydrological characteristics could deepen the understanding of regional lake water cycle, while the plant distribution is an important indicator of the hydrological characteristics of the Mega Dune. This paper took the *Tamarix laxa* as the research object, measured the water content by drying method, analysed the spatial and temporal variation characteristics of the water content, then explored the indicative significance to the hydrological characteristics of the Mega Dune. The results showed: the soil profile of *Tamarix laxa* distribution area can be divided into moisture rapid change layer (0 to 60 cm), moisture active layer (60 to 120 cm) and moisture relatively stable layer (120 to 200 cm) according to its moisture characteristics, and the moisture content tends to decrease with increasing depth, and the average moisture content of rapid change layer is 1.69%, which is significantly higher than the other two layers. The water content of the distribution area is 95.83% in the range of 0.50% to 3.00% and the observed maximum value was 4.88%, all of them are less than the field water capacity (5.00%), which indicated that it was difficult to form gravity water in the *Tamarix laxa* distribution area at the leeward slope of the Mega Dune, but also indicated that the precipitation is difficult to quickly infiltrate to replenish lake water as gravity water for the leeward slope of the Mega Dune. The "arborization" growth characteristics of *Tamarix laxa* and its special distribution position are not only conducive to its root tiller propagation, but also to the storage and maintenance of water, which maintains its survival and development.

Keywords: Mega Dune; *Tamarix laxa*; hydrological significance; Badain Jaran Desert
CLC: P933 **DC**: A

0 引 言

巴丹吉林沙漠地处阿拉善高原西部,面积5.2万km^2,是我国第二大沙漠[1]。沙漠以南的合黎山、北大山和黑山头等将其与河西走廊分开,东南部与腾格里沙漠以雅布赖山为界,向西与西北延伸至低平的古日乃草地,北部以拐子湖湿地为界,逐渐过渡为蒙古戈壁[2]。巴丹吉林沙漠气候属于极端大陆性荒漠类型,年降水量<90 mm,主要发生在6—8月,年平均气温9.5~10.3 ℃,年平均风速2.8~4.6 m/s。沙漠里分布有新月形沙山、星状沙山、横向沙垄、新月形沙丘链、新月形沙丘和线形沙丘等沙丘地貌类型,其中相对高度>200 m的沙山分布面积占沙漠面积的50%以上,集中分布于沙漠东南部,最高者可达460 m,为世界之最[2]。高大沙山间的低地分布着110个淡、微咸、咸、盐和卤5种类型内陆湖泊(包括),且依一定的方向展布[3-5],形成了奇特的高大沙山-湖泊相伴而生的景观。20世纪60年代以来,巴丹吉林沙漠逐渐受到国内外研究者的广泛关注,尤其是近20多年来,巴丹吉林沙漠中湖泊的形成及水来源成为研究焦点[6-14]。

沙漠湖泊的形成及水来源目前有4种学说,分别是大气降水补给[15-17]、临近地区补给[18-20]、古水补给[21-22]和远源补给[23-24]。其中:大气降水学说认为沙漠湖泊水来自大气降水的入渗补给,其依据为沙漠湖泊大多集中分布于高大沙山密集分布且降水量较大的东南部,沙山累计面积约为湖泊面积的10余倍,可形成了广阔的集雨面,当有降水发生时,汇集雨水,通过入渗补给湖泊[25-26];还有学者认为雨水在沙层以高含量膜状水向下运移,最终转化为重力水快速向下运移,补给湖泊水[27-28];然而,有些学者却认为现代降水在沙山入渗深度非常有限,最大不超过1 m,难以转化为重力水快速入渗补给湖泊和地下水[19,24]。沙山位于大气层与湖泊水面之间,是大气水分与湖泊之间水热交换的通道,探明其水分特征及运移规律对理解湖泊水来源研究非常重要。验证降水补给湖泊学说的一个关键的过程就是科学判断高大沙山的水分类型,只有当存在重力水

时,降水才有可能快速入渗补给湖泊,反之,则水分运移的数量及速度均较小,难以补给湖泊。因此,深入研究高大沙山水分特征,科学判断其水分类型对验证这一学说具有一定的科学意义。

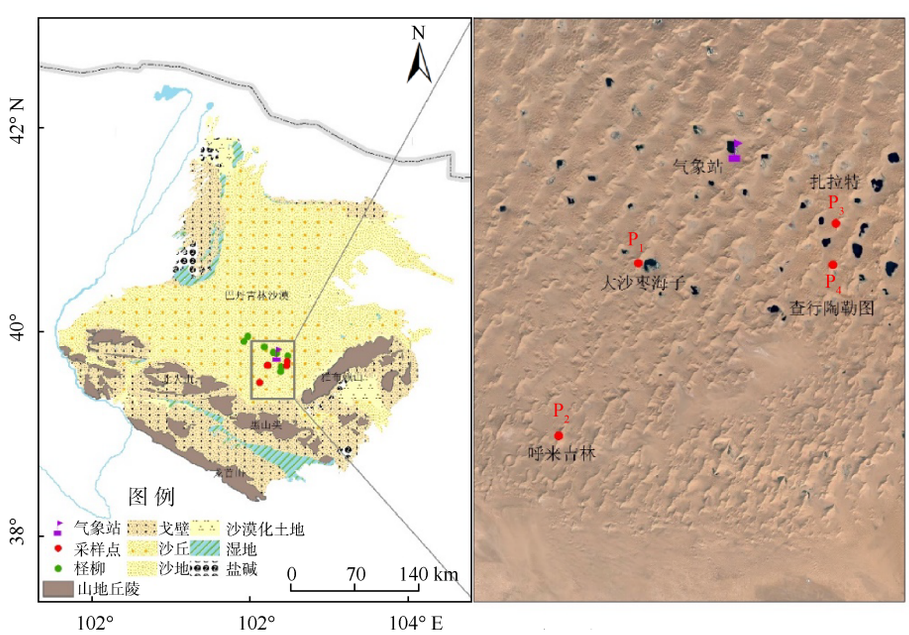
植被与沙山水分具有密切联系,对其水文特征具有重要的指示作用,一般指示着较高且稳定的水分特征[27-28]。在多次的野外考察中,在沙漠东南部的高大沙山背风坡中上部有短穗柽柳(*Tamarix laxa*)分布,且形态高大,主干明显,株高可达3.0~4.0 m,地径可达5.0~6.3 cm,冠幅可达9.9 m×10.1 m。一般情况下,柽柳分布于绿洲边缘或地下水位埋深较浅的地方,指示着较高的含水量[29-30],而巴丹吉林沙漠短穗柽柳分布于相对湖面101~244 m高度处,很难直接吸取地下水,主要依靠降水补给土壤水分,巴丹吉林沙漠地区年均降水量<90 mm,如何养育"乔木化"短穗柽柳?前期研究表明,柳分布区含水量高于相同坡向的裸露沙山[31],指示短穗柽柳分布含水量可代表高大沙山背风坡土壤水分的上限。故如果短穗柽柳分布不存在重力水,即可推断裸露沙山背风坡亦难以存在重力水,降水在该区也就难以转化为重力水快速渗透补给湖泊水。鉴于此,本文以高大沙山短穗柽柳为研究对象,基于野外调查、室内测试及统计分析相结合的方式研究短穗柽柳分布区土壤水分特征及其水文指示意义,解释高大沙山背风坡柽柳生存及发展的原因,完善巴丹吉林沙漠降水-沙山-湖泊水循环研究。

1　研究材料与方法

1.1　样地选取及样品采集

巴丹吉林沙漠发现的短穗柽柳主要分布于东南部高大沙山的背风坡中上部,呈灌丛状分布,面积约100~140 m^2。本文选取大沙枣海子(P_1)、呼来吉林(P_2)、扎拉特(P_3)和查行陶勒图(P_4)4处背风坡短穗柽柳分布区为研究样地(图1)。样地规模为10 m×10 m,平均海拔1 400 m,相对湖面平均高度101~244 m。样地周边伴生有灌木沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)和霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)等,草本植物沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)等(表1)。

野外采样时间包括2015年5月26—29日、7月10—12日、8月20—22日及9月21—24日,数据用于分析短穗柽柳分布区土壤水分的时空动态特征,以及2016年5月15—18日,数据用于短穗柽柳分布区土壤水分类型的统计。在4个样地采用手摇钻在短穗柽柳根基附近采集样品(采样当时,无降水事件发生),2015年共采样4次,采样深度为200 cm,间隔20 cm,每层重复2次,合计采集样品320份;2016年采样深度为500 cm,间隔20 cm,每层重复2次,合计采集样品200份。降水数据采用车日格勒自动气象观测系统(品牌:Vaisala,型号:MAW301)。数据分析和制图分别采用SPSS13.0和OriginPro9.0。



注:P_1~P_4为研究样地编码。

图1　研究区地理及气象站位置

表1 样地基本概况

样地名称(编号)	海拔/m	相对高度/m	坡度/(°)	坡向	伴生物种
大沙枣海子(P_1)	1 344	182	20~23	背风坡	沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)
呼来吉林(P_2)	1 409	101	18~15	背风坡	沙米(*Agriophyllum squarrosum*)
扎拉特(P_3)	1 398	196	25~27	背风坡	霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)、碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)、百花蒿(*Stilpnolepis centiflora*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)
查行陶勒图(P_4)	1 436	244	23~25	背风坡	霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)

2 结果分析

2.1 采样期降水特征

本文主要分析了2015年采样期(4月1日—10月30日)的降水资料,结果显示采样期总降水次数44次,累计降水量77.4 mm,集中分布在4、7和9月份,降水量分别为21.1、22.1和19.2 mm,合计占总降水量的80.6%。采样期≤5.0 mm无效降水事件发生时间有41 d,占降水总时间的93.2%,累计降水量46.9 mm,占总降水量的60.6%;>5.0~10.0 mm的小降水事件只在9月3日发生过1次,降水量为5.5 mm,占总降水量的7.1%;>10.0~25.0 mm的中降水事件发生2次,分别是4月1日,降水量为10.8 mm,7月8日,降水量为14.2 mm,累计降水量25.0 mm,占总降水量的32.3%。

2.2 短穗柽柳分布区土壤水分时空动态特征

短穗柽柳分布区土壤平均含水量为1.22%,随深度增加整体呈减小趋势(图2)。剖面土壤含水量波动范围为0.75%~2.67%,其中,0~60 cm沙层水分含量最高,波动剧烈,水分平均值为1.69%.2015年7月8日降水14.2 mm,属于中雨事件,对沙山水分应有有效补给,因此,在雨后7月10—12日到达沙漠开展了采样工作,结果发现该场降水对0~60 cm沙层含水量具有有效补给,该层次水分最大观测值达4.88%;长期干旱后,如2015年9月21—24日该层次水分最低值达0.54%,二者相差4.34%。60~120 cm沙层水分含量次之,波动较弱,平均值为1.07%,最大值为1.53%,最小值为0.75%,极差0.78%。120~200 cm沙层水分最低,几乎保持稳定,平均值为1.02%,最大值为1.35%,最小值为0.81%,极差0.54%。根据上述观测统计结果可将短穗柽柳分布区剖面土壤水分划分为以下层次:

(1)水分速变层(0~60 cm),是水分与大气交换的媒介,直接受大气条件的影响,沙层水分与大气间的水分交换频繁而剧烈,雨后可迅速增加至接近田间持水量水平,长期干旱时可能会下降至1.00%以下;(2)水分活跃层(60~120 cm),水分受大气或气候影响虽然较弱,但受植物蒸腾耗水影响明显,是短穗柽柳生长初期的水分主要供应层次;(3)水分相对稳定层(120~200 cm),几乎不受大气环境和植物根系活动的影响,基本保持恒定。

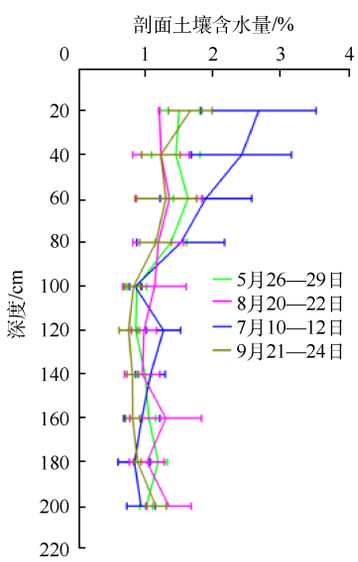


图2 不同时间短穗柽柳分布区土壤水分垂直变化

将相同月份剖面的所有土壤水分观测值平均,得出短穗柽柳分布区该月份土壤平均含水量。短穗柽柳分布区土壤平均含水量随月份变化呈现显著变化,其中7月份平均含水量为1.44%,显著高于其他月份(P<0.05),但该月份土壤水分波动剧烈,观测最大值为4.88%,最小值为0.28%,极差达4.60%。而5、8和9月土壤水分平均值较低,分别为1.19%、1.17%和1.10%,但相对稳定。5月观测最大值为2.39%,最小值为0.66%,极差为1.73%;8月观测最大值为2.86%,最小值为0.38%,极差为2.48%;9月观测最大值为2.58%,最小值为0.51%,极差为2.07%。

3 讨 论

3.1 柽柳分布区土壤水分特征

巴丹吉林沙漠高大沙山短穗柽柳林地土壤水分整体较低,平均值为1.22%,符合区域干旱气候特征,但在不同的时空尺度上波动剧烈。在时间尺度上,7月份降水较多,共降水22.1 mm且有一场>10.0 mm的有效降水事件,柽柳分布区水分得到有效的补给,显著提升,与其他月份水分形成显著差异。形成这种现象的原因除受降水量影响外,还可能与巴丹吉林沙漠"乔木化"生长的短穗柽柳树干茎流有关。众多学者对荒漠灌丛树干径流特征开展了研究,结果显示荒漠灌丛可改变降水的再分配过程,进而影响植被冠层下土壤水分的空间响应。荒漠植物树干茎流的形成使降水汇集于主干,形成点状入渗,增加降水入渗的数量和深度[31-32]。巴丹吉林高大沙山短穗柽柳冠幅较大,主干明显光滑,具有形成树冠集流和树干径流的条件。当降水事件发生时,首先可能在冠层汇集,然后汇集于主干,形成树干径流,以点状形式入渗沙层,有效地增加降水的入渗数量和深度。在当无降水事件发生时,短穗柽柳分布区不仅具有沙面蒸发,还有短穗柽柳蒸腾,在蒸发蒸腾的双重作用下,沙层水分快速消耗,造成沙层水分的剧烈波动。在垂直尺度上,0~60 cm沙层,直接受大气条件的影响,与大气间的水分交换频繁而剧烈,致使该层次水分变异最为剧烈;60~120 cm沙层水分受大气影响较弱,但受植物蒸腾耗水影响明显,致使该层次水分仍有一定的波动;120~200 cm沙层几乎不受大气环境和植物耗水的影响,含水量几乎恒定。

3.2 短穗柽柳分布指示的高大沙山水文意义

土壤水分类型通常包括重力水、吸附水(吸湿水和膜状水)、毛管水和气态水4种类型,准确判定水分类型是研究其运移规律的前提。这是因为重力水是大于田间持水量的土壤含水量,这类含水量在重力的作用下可快速运移,补给地下水或地表水[33],而其他水分类型运移均小于田间持水量,运移的速度和数量均较小,难以快速下渗补给湖泊。故土壤水分类型决定着降水能否入渗透过沙山补给湖泊。如果沙山中有重力水存在,那么降水就有可能快速下渗补给地下水和湖泊水,符合大气降水补给湖泊的理论假说,反之,则无法补给地下水和湖泊水[19,24]。目前,已有很多学者测定了巴丹吉林高大沙山田间持水量,但结果差异较大。董春雨[19]在室内利用环刀法对巴丹吉林沙漠沙层田间持水量进行了测定,证实沙层在无蒸发条件下从饱和持水量自由下渗8 h后的含水量约为18.00%,50 h后下渗趋于停止时的稳定持水量约为5.00%,并认为5.00%就是该沙漠的田间持水量;Ma等[6]测定结果为2.60%~4.00%,平均值为3.20%,但其在室内测量田间持水量时环刀上没有加盖上盖,而是覆盖了一层5 cm的干沙层,造成了被测样品的水分蒸发,并且在计算时仅采用了样品上部1~5 cm沙层24 h后的水分含量,而该沙层不仅经受了最强的蒸发、下渗,其水分还可能会以薄膜水的形式在水势梯度下向表层干沙移动,致使其田间持水量测量结果异常偏低。因此,测量过程不规范是造成田间持水量测量结果差异较大的主要原因。相比之下,董春雨[19]的测量过程符合规范,结果可信。

本文对520份土壤水分观测值的频率分布进行了统计分析(图3),结果显示,95.83%土壤水分观测值为0.50%~3.00%,3.8%土壤水分观测值为3.00%~5.00%,且无大于田间持水量的水分观测值。柽柳分布指示着巴丹吉林沙漠高大沙山较高的土壤水分,但短穗柽柳分布区的含水量观测值频率统计显示均小于田间持水量(5.00%),据此,可推断巴丹吉林沙漠高大沙山背风坡亦难以形成重力水,主要为吸附水。出现这种现象的原因可能是在不断的风力作用下,迎风面干沙被吹起、运移,最后沉积于背风坡。长期风力作用下,背风坡厚度较深的干沙层(厚度最大可达60 cm)对降水具很强的吸附作用,致使沙漠腹地以小降水事件为主的降水难以在背风坡形成重力水。另外,通过多次野外考察,沙漠腹地存在丰富的地下水,其确实会在毛管力作用下上升在沙层中形成毛管水,但其上升高度与其颗粒组成密切相关,颗粒越粗,上升速度越快,上升高度越低,反之亦然。巴丹吉林沙漠高大沙山颗粒以中、细砂为主,毛管水上升的高度非常有限,一般≤60 cm[34-35]。由此推断,毛管水只形成于高大沙山坡脚附近。通过排除法可知,短穗柽柳分布指示的巴丹吉林沙漠高大沙山背风坡的水分类型主要为吸附水和气态水,难以形成重力水和毛管水(沙山坡脚除外),因此,降水事件至少在巴丹吉林沙漠高大沙山背风坡难以形成重力水快速入渗补给湖泊。这与Wu等[8]和董春雨[19]的研究结果相反,其核心原因在于判断水分类型的依据不同,而田间持水量是判断水分类

型的唯一依据。然而,Ma等[6]在测定过程中忽视了被测样品的蒸发、入渗等过程,造成测量结果低于实际值,降低了划分重力水的标准。

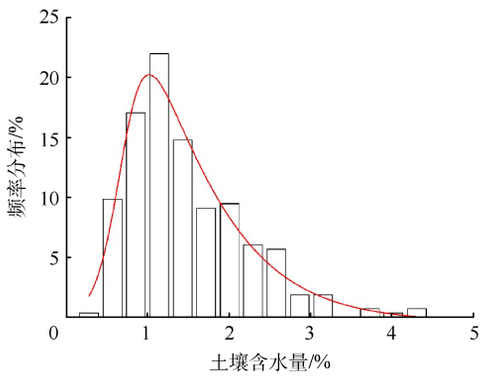


图3 短穗柽柳分布区含水量频率分布

3.3 高大沙山背风坡短穗柽柳分布的原因

短穗柽柳大多分布于高大沙山背风坡的原因可能有:(1)巴丹吉林高大沙山短穗柽柳呈灌丛状分布,"乔木化"生长,具有形成树冠集流及树干茎流的条件和优势,而树干茎流的形成可有效地补给土壤水分,维持短穗柽柳的生存与生长。在干旱荒漠区,虽然树干茎流所占降水的比例较小(5.00%~10.00%),但这部分降水高度汇集,可汇集无植被区等价树基面积20倍以上的降水量[27],且以点源形式输入土壤,可有效补给深度土壤水分。近年来还有研究表明,荒漠灌木形成树干茎流的降水临界值较低,为1.1~2.0 mm[36-39],这一结果暗示荒漠植物树干茎流不仅可在偶遇的大降水事件中产生,也可在频繁发生的小降水事件中产生,具有将干旱荒漠区传统认为的无效降水实现有效转化。(2)沙漠地区风沙活动频繁而剧烈,迎风面的干沙层在风力的作用下不断地被剥离、搬运,最终优先沉积于背风坡的中上部,生长于背风坡中上部的短穗柽柳不断被沙埋,为其根叶繁殖创造了有利条件。(3)干沙层的不断沉积还可能深刻影响着降水的封存和蒸发,有利于林地水分的吸收和保存。沙漠地区气候异常干燥,流沙蒸发强烈,降水事件后,在很短时间内便可形成干沙层,迎风面干沙层常被剥离、搬运、沉积于背风坡,增加了背风坡的干沙层厚度,而干沙层厚度的增加可封存林地水分,利于林地水分的长期保持。

4 结 论

本文以"乔木化"短穗柽柳为突破口,通过对短穗柽柳分布区土壤含水量的多次观测和统计分析,研究了短穗柽柳分布区土壤水分时空变化特征及其沙山水文意义,在此基础上探讨了降水-沙山-湖泊水循环过程及"乔木化"短穗柽柳的水分生存机制,得出以下结论:

(1)巴丹吉林沙漠高大沙山短穗柽柳分布区平均含水量为1.22%,符合干旱区气候特征,但在降水事件、灌丛树冠集流、树干径流及林地蒸散发的综合作用下,分布区水分波动剧烈。7月份降水量较多,且有强降水事件发生,水分增加明显,剖面整体水分显著高于其他月份。0~60 cm沙层水分受大气条件影响最为明显,含量高且波动剧烈,属水分速变层;60~120 cm沙层水分受大气影响较弱,但仍受植物蒸腾耗水影响,水分呈活跃变化,属水分活跃层;120~200 cm沙层水分几乎不受大气条件和植物耗水的影响,几乎保持恒定,属水分稳定层。

(2)巴丹吉林高大沙山水分类型的界定是判断现代降水能否入渗透过沙山补给湖泊水的关键,只有当沙山有重力水存在时,降水才可能快速入渗补给湖泊水,反之,则难以补给湖泊水。高大沙山短穗柽柳分布区含水量代表着高大沙山背风坡水分含量的上限,然而,统计表明短穗柽柳分布不论是正常月份还是降水事件后都不存在重力水,说明巴丹吉林沙漠背风坡难以存在重力水,降水在高大沙山背风坡亦难以形成重力水快速下渗补给湖泊。

(3)短穗柽柳的"乔木化"生长特征及特殊的分布位置,不仅有利于其根叶繁殖,还有利于对水分的捕获、储存和保持,维持着短穗柽柳的生存和发展。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 萨日娜,董治宝,南维鸽.巴丹吉林沙漠高大沙山地貌的线条美[J].中国沙漠,2021,41(2):221-230.

[3] 吴正.中国沙漠及其治理[M].北京:科学出版社,2009:1-714.

[4] DONG Z B, QIAN G Q, LUO W Y, et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert [J]. Geomorphology, 2009, 106(3):180-185.

[5] WANG N A, NING K, LI Z L, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China(Earth Sciences), 2016, 59:1633-1641.

[6] MA Y D, ZHAO J B, LUO X Q, et al. Hydrological cycle and water balance estimates for the mega dune-

lake region of the Badain Jaran Desert, China [J]. Hydrological Processes,2017,31(18):3225-3268.
[7] WEN J,SU Z B,ZHANG T T,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.
[8] WU Y, WANG N, ZHAO L, et al. Hydrochemical characteristics and recharge sources of Lake Nuoertu in the Badain Jaran Desert [J]. Science Bulletin, 2014, 59 (9):886-895.
[9] 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.
[10] 崔徐甲,孙虎,董治宝,等.巴丹吉林沙漠高大沙山湿沙层水分特征[J].中国沙漠,2017,37(2):214-221.
[11] 董光荣,高全洲,邹学勇,等.晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化[J].科学通报,1995,(13):1214-1218.
[12] 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.
[13] GATES J B, EDMUNDS W M, DARLING W G, et al. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers[J].Applied Geochemistry,2008,23(12):3519-3534.
[14] JAKEL D. The Badain Jaran Desert: its origin and development [J]. Geowissenschaften, 1996, 14(7/8): 272-274.
[15] 王涛.巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J].中国沙漠,1990,10(1):29-40.
[16] 黄天明,庞忠和.应用环境示踪剂探讨巴丹吉林沙漠及古日乃绿洲地下水补给[J].现代地质,2007,21(4):624-631.
[17] 赵景波,陈志青,马延东,等.巴丹吉林沙漠沙山区高含量薄膜水与水分平衡研究[J].地理科学,2017,37(6):960-966.
[18] 丁宏伟,王贵玲.巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析[J].干旱区研究,2007,24(1):1-7.
[19] 董春雨.阿拉善沙漠水循环观测实验与湖泊水量平衡[D].兰州:兰州大学,2011.
[20] 马金珠,黄天明,丁贞玉,等.同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源[J].地球科学进展,2007,22 (9):922-930.
[21] 杨小平.巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义[J].第四纪研究,2000,20(3):295.
[22] 王乃昂,宁凯,李卓仑,等.巴丹吉林沙漠全新世的高湖面与泛湖期[J].中国科学(地球科学),2016,46(8):1106-1115.
[23] CHEN J S, LI L, WANG J Y, et al. Groundwater maintains dune landscape [J]. Nature, 2004, 432 (7016):459-460.
[24] 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.
[25] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J].山地学报,2010,28(6):653-659.
[26] 赵景波,邵天杰,侯雨乐,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.
[27] ENRIGHT N J, MILLER B P, AKHTER R. Desert vegetation and vegetation-environment relationships in Kirthar National Park, Sindh, Pakistan [J]. Journal of Arid Environments,2004,61(3):397-418.
[28] LIU Y, FU B J, LYU Y H, et al. Linking vegetation cover patterns to hydrological responses using two process-based pattern indices at the plot scale [J]. Science China(Earth Sciences), 2013, 56(11): 1888-1898.
[29] 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 and Environment,2003,26(5):725-736.
[30] 鱼腾飞,冯起,司建华,等.黑河下游柽柳根系水力提升对林分蒸散的贡献[J].生态学报,2017,37(18):6029-6037.
[31] MARTINEZ-MEZA E, WHITFORD W G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs [J]. Journal of Arid Environments,1996,32(3):271-287.
[32] 余海龙,樊瑾,牛玉斌,等.灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆“土壤沃岛效应”的影响研究[J].草地学报,2019,27(1):1-7.
[33] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M],北京:科学出版社,2000:84-111.
[34] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J].山地学报,2010,28(6):653-659.
[35] 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.
[36] NAVAR J, BRYAN R. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam),1990,115(1/4):51-63.
[37] 杨志鹏,李小雁,刘连友,等.毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征[J].科学通报,2008,53(8):939-945.
[38] 王正宁,王新平.荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征[J].中国沙漠,2010,30(5):1108-1113.
[39] 戴岳,郑新军,李彦,等.古尔班通古特沙漠梭梭和白梭梭树干茎流特征[J].干旱区研究,2013,30(5):867-872.

(责任编辑:李拓宇)