DOI: 10.5846/stxb201310242571

王月,李程,李爱德,杨自辉,张清涛,梁晓健,邱国玉.白刺沙堆退化与土壤水分的关系.生态学报,2015,35(5):1407-1421. Wang Y, Li C, Li A D, Yang Z H, Zhang Q T, Liang X J, Qiu G Y. The degradation of *Nitraria* dunes and soil water in Minqin oasis. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1407-1421.

白刺沙堆退化与土壤水分的关系

王 月1,李 程1,李爱德2,杨自辉2,张清涛1,梁晓健1,邱国玉1,*

1 北京大学环境与能源学院, 深圳 518055

2 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站甘肃省治沙研究所, 武威 733000

摘要:近几十年来,我国西北干旱区白刺沙堆退化严重,导致固定沙丘活化,流沙掩埋绿洲,造成了严重危害。如何尽可能长期 保持白刺沙堆的稳定、防止白刺沙堆活化成为绿洲保护和沙漠化防治急需解决的问题。在多年野外观察的基础上,提出了"土 壤水分收支不平衡所导致的土壤水分减少是白刺沙堆退化的主要原因"的研究假设。但是,由于缺少长期的野外观测试验,这 个假设一直未被很好地证明。为了证明这个假设,在甘肃民勤的绿洲外围选择了雏形、发育、稳定和死亡四个退化阶段的白刺 沙堆,于 2008 年 1 月至 2012 年 6 月利用中子水分仪和土壤烘干称重法对土壤水分进行了长期观测。结果表明:各样地的土壤 含水量均呈现出 2008 年最大,2009 年和 2011 年次之,2010 年最小的趋势。年内变化是春季土壤含水量最低,夏季逐渐增加, 随后逐渐减小。在不同发育阶段,雏形阶段的土壤含水量最大,且降水容易下渗。稳定和死亡阶段的白刺沙堆土壤含水量很 低,降水难以下渗,只有大的降水事件发生时,水分才可以下渗。因此,稳定和死亡阶段白刺沙堆的土壤水分经常在植物的凋萎 点之下,是造成白刺沙堆退化重要原因。证明了"土壤水分减少是白刺沙堆退化的原因"的研究假设。研究结果对今后的植物 固沙实践活动会有积极的参考意义。

关键词:白刺沙堆;土壤水分;退化

The degradation of Nitraria dunes and soil water in Mingin oasis

WANG Yue¹, LI Cheng¹, LI Aide², YANG Zihui², ZHANG Qingtao¹, LIANG Xiaojian¹, QIU Guoyu^{1,*}
1 School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China
2 Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem& Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei 733000, China

Abstract: *Nitraria* dunes can fix a huge amount of moving sand and are one of the most effective ways to protect oasis from moving sand in Northwest China. In recent decades, *Nitraria* dunes in Northwest China have seriously degraded. As a result, the fixed sand is released, and the oasis is damaged again and again. How to sustain *Nitraria* dunes long term and prevent the *Nitraria* plant from dying is an important issue. Based on observation over time, we hypothesized that declining soil water content resulted from an imbalanced soil water budget leading to *Nitraria* dunes degradation. However this hypothesis hasn't been proved satisfactorily for the lack of long-time field experiments. To prove this hypothesis, we observed soil water content from January 2008 to June 2012 in different degradation stages of *Nitraria* dunes in the marginal oasis of Minqin, Gansu Province. The methods we used to observe soil water content was the highest in 2008 and the lowest in 2010. The variation of volumetric soil water content was the most obvious at the depth of 0-50 cm. The vertical variation pattern of volumetric soil water content was different in different degradation stages. At the depth of 0-90 cm, volumetric soil water content varied the greatest in the early growth stage and rapid growth stage for low water-holding

收稿日期:2013-10-24; 网络出版日期:2014-07-14

基金项目:国家林业公益性行业科研专项项目(201304305);国家自然科学基金面上项目(20972421);深圳市人民环境重点实验室专项

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qiuguoyu@gmail.com

capacity, high seepage power and high air permeability of soil. Three kinds of soil layers divided by soil water variation features occurred in these stages of the *Nitraria* dunes. These were sudden-change layer, stable layer and increasing layer. However, in the peak growth stage and senescence of *Nitraria* dunes, volumetric soil water content varied slightly because of crust on the *Nitraria* dunes surface. Average volumetric soil water content was lower in the early spring, gradually rising in the summer and declining in the autumn. The maximum soil water content occurred in July and September. Moreover, the variation of volumetric soil water content in different seasons was the most obvious at the depth of 0—30 cm. With increasing depth, the volumetric soil water content variation became less. During different degradation stages, the volumetric soil water content was the lowest in the peak growth stage and senescence because precipitation cannot infiltrate without a significant precipitation event. And soil water content in the peak growth stage and senescence of *Nitraria* dunes was lower than their wilting coefficient. As a result, soil water content cannot satisfy the basic water demand for plant growth which was the principle reason why *Nitraria* dunes degraded. To take advantage of precipitation efficiently and prevent evapotranspiration on the surface of *Nitraria* dunes is the key to protecting *Nitraria* dunes and stabilization. This result will provide a positive influence on subsequent vegetation sand-control activities.

Key Words: Nitraria dunes; soil water; degradation

白刺(Nitraria)广泛分布在荒漠绿洲过渡带,是我国西北干旱区荒漠、半荒漠植被的重要建群种^[1-2]。白 刺沙埋后能萌生大量枝条和不定根,可拦蓄和固定大量流沙,形成白刺沙堆(Nitraria dunes)。在荒漠绿洲过 渡带,成片的白刺沙堆固定了绿洲外围的大量流沙,对保护绿洲安全有重要作用^[3-4]。白刺沙堆从形成到衰 退,可分为雏形、发育、稳定和死亡四个退化阶段^[5]。在雏形和发育阶段的沙堆,由于有周期性的沙埋,沙源 供应充分,白刺生长旺盛。在沙堆逐渐增高变大的同时,白刺沙堆随之长高长大。到稳定阶段后,由于沙源的 限制或紊流加强,风速加大,侵蚀加强,沙堆的长宽继续增加而白刺灌丛不再长高,表面开始形成土壤结皮。 稳定后的白刺沙堆有两种演化结果:一种是沙丘进一步稳定,土壤结皮逐渐增厚,出现苔藓、地衣和地带性植 被,从而有效的维持沙堆的长期稳定;另一种是由于结皮的存在阻止了降水的下渗,白刺因为缺水而退化甚至 死亡,沙丘活化,重新成为流动沙地^[6]。

荒漠绿洲过渡带是绿洲化(开荒)过程和荒漠化(土壤退化)过程最活跃的地区^[7],其内部水分、能量的良 性循环和天然植被的有序演替是维持荒漠与绿洲稳定发展的生命线^[8-9]。近几十年来,由于水资源的过度开 采利用,我国西北干旱区地下水位急剧下降,沙漠化加速发展,白刺沙堆退化十分严重。白刺群落逐渐衰败, 局部地区的沙堆每年以 3—5 m 的速度向绿洲移动^[10-11]。位于腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠交汇处的民勤荒 漠绿洲过渡带,是中国沙漠化最严重的地区之一。水资源的过度开发利用,多年径流性水资源的减少,地下水 位不断下降,白刺不断退化,白刺沙堆活化、解体严重,绿洲萎缩,引起了土地荒漠化、盐碱化等诸多生态 问题^[12]。

土壤水分是水文循环的重要组成部分^[13]。在干旱区,土壤含水量是限制植物生长发育的重要生态因子, 影响着植物群落的生长发育及其生产力^[14]。目前,国内外学者就土壤水分时空动态及运动机理^[15-16]、植被类 型、生物结皮、降水对土壤水分的影响等内容进行了大量研究^[17-19]。荒漠区土壤水分变化过程复杂,与地形、 降水、蒸发、土壤特性及固沙植被类型和组成等各种环境因子密切相关^[20-21]。通过多年的野外观察,我们认 为土壤水分减少可能是白刺沙堆退化的主要原因。到目前为止,由于缺少长期的观测数据支持,这个假定只 能通过短期的或间接定性的方法得到了一些印证^[22-23]。因此,本研究的目的是在长期土壤水分观测的基础 上,研究不同退化阶段的白刺沙堆的土壤水分动态,验证"土壤水分减少是白刺沙堆退化的原因"的研究假 设,为维持白刺沙堆长期稳定或延缓其退化提供参考依据。

1 研究区概况

民勤地处甘肃省河西走廊东北部,石羊河流域下游,地理坐标为东经103°02′—104°02′,北纬38°05′—39° 06′,南邻凉州区,西毗金昌,东、西、北三面与内蒙古自治区接壤(图1)。处于腾格里和巴丹吉林两大沙漠之 间,三面环沙。全县总土地面积1.60×10⁴ km²,其中沙漠、戈壁、剥蚀山地和盐碱滩地等占91%,绿洲仅占9%, 绿洲边缘风沙线长达408 km。该区属温带大陆性干旱气候区。气候干旱,光照充足,热量丰富,气温日差较 大,降雨量少,风大沙多。全年日照时数3028 h,太阳辐射总量574 kJ/cm²,年平均风速2.8 mm/s,多年平均气 温7.8 ℃,多年平均降水量115 mm,蒸发量2644 mm,是全国最干旱地区之一。民勤县境内无自产地表水资 源,唯一的地表水资源为石羊河。



图 1 研究区地理位置 Fig.1 Location map of study area in China

研究区位于民勤县薛百乡境内,以甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站为依托,选取腾格里沙漠-民勤绿洲过渡带典型雨养型白刺沙堆群落为样地。在野外调查的基础上,参考学者对白刺沙堆退 化阶段的研究^[3,6,23-24],结合研究区白刺沙堆形态、土壤、植被特征,建立了雏形阶段(Site 1,简称 S1)、发育阶段(Site 2,简称 S2)、稳定阶段(Site 3,简称 S3)、死亡阶段(Site 4,简称 S4)4个样地。各样地地理位置和高程见图 2、表 1。

2 研究方法

2.1 气象观测

经过野外勘察,在样地1附近选取平坦开阔的区域架设自动气象站,并进行检测和调试,于2010年5月

1409

12 日起正常运行。观测气象数据为降水量,仪器型号为 7852M-AB, DAVIS, USA,安装高度 2 m,精度为±0.2 mm。气象站采用太阳能驱动,利用数据采集仪(DT500 series 5, Datataker, Australia)连续自动观测和记录,数据采样间隔为 5 s,每 10 min 记录 1 次降水总量。观测起止时间为 2010 年 5 月 12 日至 2012 年 6 月 17 日。2008 年 1 月 1 日至 2010 年 5 月 11 日的降水数据通过校正中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)中民勤气象站的数据获得。民勤气象站(38°38′0.02″N,103°4′59.88″E)距离 1 号样地 14.37 km,将其所测 2010 年 5 月 12 日至 2012 年 6 月 17 日的降水数据同实测数据进行相关分析和线性回归分析。结果表明两者显著相关,相关系数为 0.927(*P*<0.01)。之后利用线性相关系数将自测点观测系列前延至 2008 年1 月 1 日。



图 2 试验地及不同退化阶段白刺沙堆样地分布图

Fig.2 Satellite image of Minqin desert-oasis ecotone study area with the position of the measurement sites for *Nitraria* dunes in different degradation stages

S1、S2、S3、S4分别为雏形阶段、发育阶段、稳定阶段、死亡阶段白刺沙堆样地, MQNS为甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, AMS为自动气象站

S1, S2, S3, S4, Minqin national station for desert steppe ecosystem studies (MQNS) and automatic meteorological station (AMS) indicated. The four small pictures represent the *Nitraria* dunes in early growth stage (S1), rapid growth stage (S2), peak growth stage (S3), and senescence (S4) respectively

表 1	不同退化阶段白刺沙堆样地地理位置及高程

Table 1	Longitude,	latitude.	and altitude	of four	measurement	sites
	,	,				

样地及气象站 Measurement sites	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m
样地 1Site 1	38°37′48.4″N	102°55′05.0″E	1409
样地 2Site 2	38°36′40.2″N	102°56′42.5″E	1415
样地 3Site 3	38°35′05.1″N	102°58′28.6″E	1389
样地 4Site 4	38°35′19.5″N	102°58′15.2″E	1369

2.2 土壤水分观测

土壤水分观测分为两部分。采用中子水分仪分别连续观测 4 个样地白刺沙堆的土壤含水量。每个样地

选取代表性较好的白刺沙堆,使用 CNC503DR 型中子水分仪(北京核安核子仪器有限公司),2008 年1月至2012 年6月每月1次观测土壤含水量。每个样地分为10、30、50、70、90、110、130、150、170、190 cm 共10 个层次。由于死亡阶段的白刺沙堆的深层土壤(深度为150—190 cm)是粘土,而不是沙土。粘土的土壤含水量与沙土的土壤含水量无法比较,因此死亡阶段该深度的土壤含水量在本文中未作讨论。2011 年8月,用环刀法测各样地每层的土壤容重,用土钻在每根中子监测管周围对称取2—4点并取样,每层3个重复。测定的深度与中子仪的测定深度一致。中子仪探测的慢中子计数主要是快中子与土壤里的氢原子相碰撞而得到的。土壤越湿,探测器周围的碰撞机会就愈大,进入探测器的慢中子数的概率愈高。由于中子计数与土壤含水量成正比,做出中子计数比和土壤含水量的标定直线后,可据此计算土壤含水量。

本研究中,各样地体积含水率与中子水分仪读数比的标定方程为:

$$\theta = 0.0003R/Rs + 0.0081 \tag{1}$$

式中, θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3),R为土壤的中子计数,R,为标准计数,R/R,为中子计数比。

采用烘干称重法,在降雨前后对4个样地白刺沙堆土壤含水量进行观测。每个样地选取5—7个典型白 刺沙堆观测0—100 cm的土壤含水量。分为8个层次:5、10、15、20、30、50、70、100 cm,每层3个重复。测量 时,使用土钻法或剖面法将各个深度的土样收集到特制铝盒中,将铝盒密封后尽快带回实验基地,用精度为 0.01 g的天平测量铝盒与土壤的鲜重,在烘箱105℃的温度下烘干24 h达到恒重后测量铝盒与土壤的干重。 采样时间分别为2010年5月15日、5月20日、7月1日、7月6日、7月15日和7月24日。

3 结果与分析

3.1 研究区降水变化特征

由表 2 可知,研究区降水季节分配不均,主要集中在以 5 月、7—9 月为代表的夏季和秋季,占全年降水量的 79%。月降水量以 5 月、8 月或 9 月为拐点,呈现"增加-减少-增加-减少"的趋势,2008—2011 年最大月降水量分别为 62.2 mm(2008 年 7 月)、52.6 mm(2009 年 8 月)、23.0 mm(2010 年 9 月)、36.5 mm(2011 年 8 月), 占全年降水量的 38%、44%、25%、34%。2008—2011 年生长季(5—10 月)降水量分别为 133.6、115.2、82.5、 95.2 mm,大部分集中在生长季末期 8—9 月份。2008—2011 年全年降水量与民勤多年平均降水量 115 mm 相比^[25],2008 年为丰水年,2009 年为平水年,2010 年为枯水年,2011 年为平水年。

				T	Table 2	Monthly an	d annual p	orecipitatio	n			
年份 Year	月份 Month										全年	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11—12	- Annual precipitation
2008	12.8	0.1	0.2	15.8	3.1	9.1	62.2	16.2	40.8	2.2	1	163.4
2009	0.8	0	0	0.8	9.4	6.9	10.5	52.6	34.6	1.2	4	120.7
2010	0	1.1	0.9	8.3	22.5	6.5	1.7	19.4	23	9.4	0.7	93.5
2011	2.2	1.6	2.2	1.4	9.6	8.7	13.5	36.5	20.9	6	3.5	106.1
2012	2.9	0	0.8	1.9	13.9	0	—	—	—	_	—	—

表 2 研究区月降水量和年降水量/mm

如图 3 所示,研究区降水频度小,强度大。日降水量的雨量级分布特征表明,0—5 mm 降水最多,占全年降水事件的 88%,大于 5 mm 降水事件出现频率仅为 12%。2008 年共有 8d 日降水超过 5 mm,分别为 1 月 19日、4 月 11日、7 月 18日、7 月 28日、7 月 30日、8 月 20日、9 月 22日和9月 25日,其中 4 月 11日、7 月 28日、7月 30日和9月 22日 4d 日降水量超过 10 mm;2009共有 7d 日降水超过 5 mm,分别为 6 月 18日、7 月 8日、8 月 18日、8 月 24日、8 月 25日、9 月 5日和9月 6日,其中 8 月 18日、8 月 25日、9 月 5日和9月 6日 4d 日降水量超过 10 mm;2010年共有 5d 日降水量超过 5 mm,分别为 5月 17日、5月 25日、6月 29日、9月 20日和 10月 25日;2011年共有 6d 日降水量超过 5 mm,分别为 5月 11日、7月 4日、8月 15日、8月 17日、8月 18日和

40 35 30 25 20 15 10 5 降水量 Precipitation/mm 0 -01 2008-07-01 2009-10-01 2008-04-01 2008-10-01 2009-01-01 2009-04-01 2009-07-01 2010-01-01 2010-04-01 2008-01 40 35 30 25 20 15 10 5 0 2010-08-12 2010-10-12 2010-05-12 2011-01-01 2011-04-01 2011-07-01 2011-10-01 2012-01-01 2012-04-01 日期 Date

9月16日,其中,8月15日和8月17日2d日降水量超过10mm。2008—2011年有降水发生的日数为52d、49d、44d和27d。

图 3 研究区日降水量变化(2008-2012年) Fig.3 Daily precipitation from 2008 to 2012

3.2 不同退化阶段白刺沙堆土壤水分的时间变化

将中子水分仪测得的 2008—2012 年土壤体积含水量平均为表层 0—50 cm、中间层 70—130 cm 和深层 150—190 cm 3 个深度,对照分析不同退化阶段各深度白刺沙堆土壤水分的年际变化特征(图 4)。可以看出, 不同退化阶段白刺沙堆土壤含水量随时间波动的趋势大体一致。

如图 4 所示,年际变化方面,各样地 3 个深度的土壤含水量均呈现出 2008 年最大,2009 年和 2011 年次 之,2010 年最小的趋势。其中,以 0—50 cm 表现最为明显,2008 年 0—50 cm 的土壤含水量变化范围为 0.031—0.053 m³/m³,而 2010 年仅为 0.014—0.029 m³/m³。

结合降水数据可知,2009 年和 2011 年降水量相当,但 2011 年不同深度的土壤含水量在降水日 6 月 21 日、8 月 1 日和 10 月 30 日表现出更大的波动性,形成更多极值点,这可能与 2011 年降雨事件强度更大、连续性更好有关。2011 年 6 月 21 日,0—50 cm 雏形和稳定阶段白刺沙堆土壤含水量分别为 0.047、0.041 m³/m³; 70—130 cm 稳定阶段白刺沙堆土壤含水量达到 0.049 m³/m³。2011 年 10 月 30 日,0—50 cm 稳定阶段土壤含水量也达到 0.047 m³/m³。相比之下,70—130 cm 和 150—190 cm 土壤含水量的年际变化随着深度的增加,变化趋于平缓,波动性显著减小。总之,白刺沙堆土壤含水量与降水量和降水强度相关,愈浅层相关性愈大。且白刺沙堆具有深层土壤含水量趋于稳定的规律。



Fig.4 Mean volumetric soil water content from 2008 to 2012 in different degradation stages

雏形阶段白刺沙堆土壤含水量随着深度的增加年际变化减小,150—190 cm 深度基本维持在 0.020— 0.030 m³/m³。发育阶段的年际变化趋势在 70—130 cm 和 150—190 cm 高度一致,各年份差别不大,分别在 0.030—0.040 m³/m³和 0.040—0.055 m³/m³内变化。稳定阶段白刺沙堆土壤含水量在 2008、2011 年最大, 2009、2010 年较小,原因在于 2008、2011 年降水量较大且 2011 年降雨强度更大、持续性更久。垂直方向上,随 着深度的增加土壤水分波动幅度变小。对于不同退化阶段的白刺沙堆而言,死亡阶段土壤含水量的年际变化 最小,70—130 cm 深度土壤水分在 0.012—0.032、0.016—0.023 m³/m³内变化。可能原因是:(1)由于根系分 布较浅和表层的结皮,有效地抑制了降水等因素对土壤水分的影响^[26],土壤水分变异最小;(2) 从雏形阶段 到死亡阶段,白刺沙堆随着流沙的固定,粉砂级颗粒沉积,土壤机械组成随固沙时间的增加而变细。土壤中的 细砂粒和粘粒含量较高时,降水后土壤保水能力强,因而降雨事件后土壤水分损失较慢^[27]。死亡阶段白刺沙 堆属于固定沙丘,而固定沙丘并非理想的固沙模式,水分条件差,这也是白刺大面积衰退、死亡的主要原因 所在。

土壤含水量与降水时间分布密切相关,降水的季节性差异往往导致土壤水分的季节性变化[26]。将每个



样地各层次相同月份的土壤含水量平均值作图得到季节变化图(图5)。



由图 5 可知, 土壤水分季节变化方面, 由于春季气温逐渐升高, 干旱多风, 降水少, 蒸发旺盛, 同时白刺发 芽开始耗水, 春季土壤含水量最低; 夏季随着降水的补给, 波动增加, 在 7 月或 9 月达到最大值, 随后气温降 低、降水减少,沙堆土壤含水量逐渐减小。这一规律与毛乌素沙地、禹城沙地、沙坡头地区和民勤灌丛沙堆区的研究结论一致:土壤水分的季节变化表现为春季的水分蒸发消耗阶段(4—5月);夏季降水补给阶段(6—9月下旬);秋季失水阶段(10—11月)^[28-31]。土壤含水量的季节变化随着土层深度的增加而愈加不明显,稳定阶段白刺沙堆土壤含水量除 190 cm 土层外,其他土层含水量季节变化明显。其他阶段白刺沙堆只在 0—30 cm 土层表现出明显的季节变化。

图 6 为不同退化阶段白刺沙堆各层土壤体积含水量平均值对应的标准差,一定程度上指示出土壤含水量 变异性。锥形阶段白刺沙堆土壤含水量最大值出现在 9 月份的 10 cm 深度,大小为 0.076 m³/m³。表层 10 cm 和 30 cm 的土壤含水量以 5 月、6 月和 9 月为拐点,经历"增加-减小-增加-减小"的过程,其他深度土壤含水量 大致在 0.020—0.040 m³/m³范围内,标准差均小于 0.010 m³/m³,变化较小。发育阶段白刺沙堆各层土壤含水 量季节变化趋势较为一致,5 月、7 月和 9 月为高值点,呈现"增加—减小—增加—减小—增加—减小"的规 律,但同一深度变化幅度小,只有 10 cm 标准差大于 0.010 m³/m³。雏形、发育阶段白刺沙堆土壤含水量仅表 层变化较大,可能原因是荒漠绿洲过渡带地区高蒸发量和低降雨量以及沙地土壤特性综合作用的结果^[7]。 除 190 cm 深度外,稳定阶段白刺沙堆各层土壤含水量表现出高度一致的季节变化趋势,6 月、9 月和 11 月土 壤含水量较高,标准差也最大,可能是由于降水发生强度大,下渗速率随之增加^[25],使得土壤含水量的变化幅 度大。11 月 30 cm 土壤含水量达到 0.027 m³/m³,其他月份土壤含水量基本不变,在 0.020 m³/m³左右。死亡 阶段白刺沙堆土壤季节变化以 10 cm 和 30 cm 为代表,5、7 和 10 月份土壤含水量较高,其他深度土壤含水量 在 0.018—0.020 m³/m³范围内,标准差基本小于 0.020 m³/m³。流沙固定使得土壤颗粒向粉粒发展,结皮的存 在有效的阻止了水分的下渗,大部分的降水都集中在结皮层,10%—40%的年降水量被生物土壤结皮拦截而 不能渗透到较深层土壤^[32]。因此表层(0—30 cm)土壤水分有较大变化,而 50—130 cm 深度水分变化极小。 总的来说,除了稳定阶段,其他阶段白刺沙堆土壤水分仅表层变化较大。

不同发育阶段白刺沙堆土壤水分及其变异性方面, 雏形阶段稍大于发育阶段, 稳定阶段次之, 死亡阶段最小。可能原因是: 雏形阶段、发育阶段白刺沙堆属于流动沙丘, 植被覆盖度低, 表层无结皮, 沙埋使得表层覆盖 有干沙层, 土壤颗粒以砂粒为主。土壤较低的持水力、高孔隙度、高渗透力和良好的通气性等特征决定了其土 壤水分及其变异性较大。稳定阶段白刺沙堆 53%的根系生物量分布在 0—30 cm^[33], 使得土壤颗粒以砂粒和 粉粒为主, 孔隙度大。但是由于植被覆盖度最大以及表层有结皮, 有效地抑制了降水等因素对土壤水分的影 响, 沙堆较大, 有一定的坡度, 容易产生侧流, 减少了水分入渗, 沙堆水分条件不断恶化, 白刺开始因缺水而向 死亡阶段演化, 导致土壤水分及其变异性小于雏形、发育阶段。死亡阶段白刺沙堆根系分布较浅, 表层存在较 厚结皮, 阻止了降水下渗^[26], 同时白刺沙堆随着流沙的固定, 土壤机械组成随固沙时间的增加而变细^[6], 最终 导致其土壤水分及其变异性最小。

3.3 不同退化阶段白刺沙堆土壤水分的垂直变化

图 7、图 8 是中子水分仪所测得的 2008—2012 年不同退化阶段白刺沙堆 0—190 cm 土壤体积含水量的垂直变化图。可以看出,不同退化阶段土壤水分垂直变化趋势差异明显。其中,雏形阶段白刺沙堆土壤含水量垂直波动性最大,以 0—90 cm 最为明显,呈现开口向右的"W"型。受降水、干沙层等因素的影响,表层 10 cm 土壤含水量最大,2008 年 9 月 25 日达到 0.084 m³/m³。10—30 cm 土壤含水量直线减小,30—50 cm 逐渐增大,50—70 cm 再次减小。90 cm 以下水分变化不大,150—190 cm 呈现略微增加的趋势。由于雏形阶段土壤颗粒较粗,毛管上升高度较低,下层水分不能补给上层^[34],白刺沙堆成为相对较稳定的系统。因此,90—150 cm土层土壤水分变化小。发育阶段土壤含水量垂直变化呈"S"型,0—30 cm 急剧减小,在 30 cm 达到最小值,2011 年 8 月 1 日仅为 0.012 m³/m³,30—170 cm 逐渐增加,170—190 cm 再次减小。这种"S"型曲线规律与毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分的研究结论^[35]一致。垂直变化方面,雏形、发育阶段白刺沙堆土壤含水量表层 0—90 cm 波动较大,呈现出速变层、稳定层和增加层的分层特征。0—30 cm 土层受降水和蒸发的影响,水分变化相对剧烈,具有接纳雨水快、蒸发快、干湿变动频繁等特点^[36]。雏形和发育阶段白刺沙堆体积



图 6 不同退化阶段白刺沙堆不同深度土壤体积含水量的标准差(SD) Fig.6 Standard deviation (SD) of volumetric soil water content at different depthsandindegradation stages

和高度相对较小,各径级根系(粗根、中根和细根)主要分布在 0—60 cm^[33],这也是雏形和发育阶段白刺沙堆 0—90 cm 土壤水分表现出更大波动性的原因之一。对于深层土壤而言(110 cm 以下),由于沙堆以下为质地 坚硬的粘土层,水分下渗较少,且民勤荒漠绿洲过渡带地下水位已从 20 世纪 50 年代的 1—3m 下降到 16.43— 22.22m,植物很难利用^[12,37],根系对于深层土壤水分的变化基本无影响,深层土壤水分变化较小。

稳定阶段白刺沙堆土壤水分垂直变化最小,表现为"1"字型,不同土层深度的土壤水分基本一致,在 0.014—0.024 m³/m³范围内变化。2008年9月25日、2011年6月21日和10月30日各深度土壤水分显著增 加,且 0—90 cm 增加幅度最大,90 cm 以下变化较小。浅层土壤水分受地表植被覆盖、气候条件等的影响,变 化显著,标准差较大;深层土壤水分受地表条件影响小,环境相对稳定,变化和缓,标准差较小(图6)。2008 年由8月30日的0.016—0.022 m³/m³增大至0.053—0.066 m³/m³,2011年由5月10日的0.013—0.019 m³/m³增加至0.053—0.061 m³/m³。结合降水数据可知,2008年9月21日至9月27日连续降雨,日降雨量依 次为5.0、18.2、0.2、1.6、5.0、1.8、0.2 mm,7d降水总量达到32.0 mm。2011年6月21日降水量为4.4 mm,10 月25日和10月28日有间断性降水,日降水量分别为0.3、2.5 mm。由图7可知,9月25日是2008年各个白 刺沙堆样地土壤含水量最高的时段,以稳定阶段白刺沙堆响应最为明显。降水后,稳定阶段白刺由于得到水 分补给迅速生长,植被覆盖度增加,表层根系密度大、分布多,吸收水分。干旱区,土壤含水量的极值通常与降 水事件有关,特别是连续性、高强度降水^[38-39]。死亡阶段白刺沙堆表层10—30 cm 土壤含水量较大,可达到 0.050—0.060 m³/m³,其他土层则基本维持在0.015—0.020 m³/m³不变。稳定、死亡阶段白刺沙堆土壤水分 垂直变化小,只有高强度降水事件发生时,水分在70—130 cm 范围内下渗变化。结皮的存在、植物覆盖度较 高等因素导致降水较难补给较深层土壤^[26]。

由于研究区地下水位埋深大,降水成为补充荒漠绿洲过渡带土壤水分的主要来源。图9是不同退化阶段 白刺沙堆2011年3次降雨事件前后土壤质量含水量变化量。2011年5月15至20日前后降水总量为9.6 mm,降水次数为3次,降水强度分别为5月9日2.8 mm、5月11日5.4 mm和5月20日1.4 mm。2011年7月



图 7 不同退化阶段白刺沙堆土壤体积含水量垂直变化(2008—2010 年) Fig.7 Vertical changes of volumetric soil water content from 2008 to 2010 in different degradation stages

1 日至 6 日前后降水总量(12.8 mm)、降水次数(5次)均为最大,降水量分别为 6 月 29 日 3.6 mm、7 月 2 日 3 mm、7 月 3 日 0.2 mm、7 月 4 日 3.6 mm、7 月 5 日 2.4 mm,2011 年 7 月 15 日至 24 日降水总量为 0.4 mm,降水 次数为 2 次,降水强度分别为 7 月 23 日 0.2 mm,7 月 24 日 0.2 mm。2011 年 7 月 1 至 6 日降水次数和强度最

http://www.ecologica.cn

1417







大,5月15至20日次之,7月15至24日最小。

如图 9 所示,与降水次数和强度趋势一致,土壤质量含水量变化量 7 月 1 至 6 日最大,5 月 15 至 20 日次 之,7 月 15 至 24 日最小。2011 年 7 月 1 至 6 日最大日降水量达到 3.6 mm,除死亡阶段白刺沙堆 50—100 cm 土层,其他样地各土层土壤含水量都有增加,增加幅度为 0.07%—2.53%。垂直方向上,0—10 cm 深度土壤水 分增加幅度最大(1.10%—2.52%),降水成为干旱区浅层土壤水分空间变异的决定因素,且稳定和死亡阶段白 刺沙堆表层增加量比雏形、发育阶段大。20—100 cm 深度则雏形、发育阶段土壤水分增加量比稳定、死亡阶 段大,进一步证明了稳定、死亡阶段表层结皮、植被覆盖度高等因素对降水入渗的阻碍作用。

2011 年 5 月 15 至 20 日雏形、发育阶段白刺沙堆 0—50 cm 土壤水分有明显增加,其他阶段白刺沙堆各土 层则基本没有变化,稳定、死亡阶段白刺沙堆 0—10 cm 土壤水分变化量为负值,说明土壤蒸发消耗了土壤水 分。2011 年 7 月 15 至 24 日降水量、降水次数均最小,除 0—5cm 土层以及稳定阶段 50 cm 土层和雏形阶段 50—70 cm 土层有一定的降水下渗外,其余各样地各土层土壤水分变化量均为负值,低强度的降水在入渗前





以蒸发的方式消耗,降雨对白刺沙堆土壤水分没有影响。总的说来,降水对白刺沙堆土壤水分的有效补给,主 要受降雨强度、频率和土壤性质、结皮等因素的影响^[25]。结皮的存在、植被覆盖度大等因素阻碍降水下渗,导 致死亡阶段白刺沙堆土壤蒸发旺盛和土壤水分收支不平衡,是沙堆退化甚至死亡的重要原因^[26]。不同退化 阶段白刺沙堆由于形态、土壤性质及植被分布格局的不同,强降雨后土壤水分的入渗率及降水再分配格局有 较大差异。以雏形、发育阶段为代表,生长季内间歇性降雨和强烈的土壤蒸发,使得白刺沙堆土壤水分经历频 繁的干湿交替^[38]。

3.4 各退化阶段土壤水分充足情况评价

有研究表明,甘肃民勤流动沙丘凋萎系数为0.73%^[40-41],民勤固定、半固定沙丘的研究表明其凋萎系数为 1.36%^[42]。结合本研究民勤荒漠绿洲过渡带白刺沙堆样地情况和土壤水分数据,雏形和发育阶段白刺沙堆属 于流动沙丘,稳定和死亡阶段白刺沙堆样地属于固定或半固定沙丘且有结皮层,分别选用0.8%和1.5%作为 雏形、发育阶段白刺沙堆和稳定、死亡阶段白刺沙堆的凋萎系数。通过本研究实测所得的土壤容重换算(1.5 g/cm³)为体积含水量,对应凋萎系数分别为0.014 m³/m³(雏形、发育阶段),0.022 m³/m³(稳定、死亡阶段)。 由图 5 可知,发育、雏形阶段白刺沙堆的土壤含水量均高于凋萎系数,稳定阶段白刺沙堆绝大部分土层深度的 土壤含水量均低于凋萎系数,死亡阶段白刺沙堆的土壤含水量除表层 10 cm、30 cm,其余土层也均低于凋萎 系数。由此表明,研究区极端干旱的环境下,稳定阶段和死亡阶段白刺沙堆土壤水分不能达到维持植物生长 所需的最低水分阈值,是造成白刺沙堆退化的重要原因。

4 结论与展望

(1)年际变化方面,各样地土壤含水量均呈现出 2008 年最大,2009 年和 2011 年次之,2010 年最小的趋势。其中,以 0—50 cm 深度表现最为明显,70—130 cm 土壤含水量的年际变化随着深度的增加,变化趋于平缓,波动性显著减小。季节变化方面,春季土壤含水量最低,夏季波动增加,在 7 月或 9 月达到最大值,随后逐渐减小。季节变化在 0—30 cm 土层表现明显,随着土层深度的增加而愈加不明显。

(2)垂直变化方面,不同退化阶段土壤水分垂直变化趋势差异明显。雏形、发育阶段白刺沙堆土壤含水

35 卷

重农层 0—90 cm 彼幼校大,重块出途受层、稳定层和增加层的方层特征。稳定、死亡所设占刺沙堆土壤水方 垂直变化小,只有高强度降水事件发生时,水分在 0—90 cm 范围内下渗变化。土壤较低的持水力、高孔隙度、 高渗透力和良好的通气性等土壤特征以及根系分布是雏形阶段、发育阶段白刺沙堆土壤水分垂直波动的主要 影响因素。结皮的存在阻碍降水下渗,蒸发旺盛,是造成死亡阶段白刺沙堆土壤水分补给不足,沙堆退化甚至 死亡的重要原因。

(3)在不同发育阶段,雏形阶段的土壤含水量最大,降水容易下渗。稳定和死亡阶段白刺沙堆土壤含水 量很低,只有大的降水事件发生时,水分才可以下渗。不同退化阶段白刺沙堆土壤水分的变化幅度方面,雏形 阶段稍大于发育阶段,稳定阶段次之,死亡阶段最小。

(4)同白刺沙堆的凋萎系数相比,发育、雏形阶段白刺沙堆的土壤含水量均高于凋萎系数,稳定、死亡阶段白刺沙堆大部分土层的土壤含水量低于凋萎系数。极端干旱的环境下,稳定活化和死亡阶段白刺沙堆土壤水分不能达到维持植物生长所需的最低水分阈值,是造成白刺沙堆退化的重要原因。

(5)有效利用降水和减少白刺表面蒸散发,进而保持和提高白刺沙堆土壤含水量,是防止白刺沙堆退化、 做好防沙固沙工作的核心问题。

致谢:野外观测工作得到试验合作单位甘肃省治沙研究所和民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站 实验团体人员的帮助,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 靳虎甲,马全林,张有佳,曾新德.石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析.中国沙漠,2012,32(1):140-147.
- [2] 彭飞,王涛,刘立超,黄翠华.民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局.中国沙漠,2012,32(3):593-599.
- [3] Yang H T, Li X R, Liu L C, Gao Y H, Li G, Jia R L. Soil water repellency and influencing factors of Nitraria tangutorun nebkhas at different succession stages. Journal of Arid Land, 2014, 6(3): 300-310.
- [4] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望. 地理学报, 2010, 65(3): 339-350.
- [5] 杜建会,严平,俄有浩.甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征.生态学杂志,2007,26(8):1165-1170.
- [6] 杜建会,严平,展秀丽,俄有浩.民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素.应用生态学报,2008,19(4):763-768.
- [7] 赵成义,王玉朝. 荒漠-绿洲边缘区土壤水分时空动态研究. 水土保持学报, 2005, 19(1): 124-127.
- [8] 王兵,崔向慧.民勤绿洲-荒漠过渡区水量平衡规律研究.生态学报,2004,24(2):235-240.
- [9] 张凯,王润元,张强,司建华,杨启国,刘宏谊,王鹤龄.绿洲荒漠过渡带夏季晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征.中国沙漠,2007, 27(6):1055-1061.
- [10] Neuman C M, Nickling W G. Momentum extraction with saltation: implications for experimental evaluation of wind profile parameters. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 68(1/2): 35-50.
- [11] Qong M, Takamura H, Hudaberdi M. Formation and internal structure of *Tamarix* cones in the Taklimakan Desert. Journal of Arid Environments, 2002, 50(1): 81-97.
- [12] Li C, Wang Y, Qiu G Y. Water and energy consumption by agriculture in the Minqin Oasis Region. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12 (8): 1330-1340.
- [13] 马东豪,张佳宝,黄平.确定 Brooks-Corey 土壤水力特性模型参数的垂直入渗方法.水科学进展, 2011, 22(2): 235-241.
- [14] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究. 地理学报, 2007, 62(6): 451-461.
- [15] 朱乐天, 焦峰, 刘源鑫, 贺国鑫. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征. 水土保持研究, 2011, 18(6): 115-118.
- [16] Brunet P, Clément R, Bouvier C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) A case study in the Cevennes area, France. Journal of Hydrology, 2010, 380(1/2): 146-153.
- [17] Yao S X, Zhao C C, Zhang T H, Liu X P. Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia, northern China. Journal of Arid Environments, 2013, 97: 92-98.
- [18] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子.生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [19] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响.干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [20] 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.

http://www.ecologica.cn

- [21] 陈钧杰,蒋进,付恒飞,宋春武,全永威.古尔班通古特沙漠腹地土壤水分动态.干旱区地理,2009,32(4):537-543.
- [22] 贾晓红,李新荣,陈应武.腾格里沙漠东南缘白刺灌丛地土壤性状的特征.干旱区地理,2007,30(4):557-564.
- [23] 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.
- [24] Tengberg A, Chen D.A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso. Geomorphology, 1998, 22(2): 181-192.
- [25] 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.
- [26] 张军红,吴波.干旱、半干旱地区土壤水分研究进展.中国水土保持,2012,(2):40-44.
- [27] 常兆丰,赵明,仲生年,韩富贵. 民勤沙区植被退化与年际降水量关系的定位研究. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1295-1302.
- [28] 冯起,高前兆.禹城沙地水分动态规律及其影响因子.中国沙漠,1995,15(2):153-157.
- [29] 张国盛, 王林和, 董智, 李玉灵. 毛乌素沙区风沙土机械组成及含水率的季节变化. 中国沙漠, 1999, 19(2): 145-150.
- [30] 李新荣,马凤云,龙立群,贾晓红.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究.中国沙漠,2001,21(3):217-222.
- [31] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, Wang X P, Kim K C. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. Journal of Arid Environments, 2004, 57(1): 1-16.
- [32] 李守中,肖洪浪,宋耀选,李金贵,刘立超. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616.
- [33] 李鸿儒,王继和,蒋志荣,纪永福.白刺沙包发育过程的土壤水分与根系生物量的关系.甘肃农业大学学报,2012,45(6):133-138.
- [34] 何志斌, 赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-362.
- [35] 安慧, 安钰. 毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2247-2252.
- [36] 胡霞,刘连友,严平,孟祥亮.农牧交错带不同地表土壤水分特征研究—以内蒙古太仆寺旗为例.水土保持研究,2006,13(2):105-107,137-137.
- [37] 常兆丰,赵明. 民勤荒漠生态研究. 兰州:甘肃科学技术出版社, 2006: 39-39.
- [38] Parent A C, Anctil F, Parent LÉ. Characterization of temporal variability in near-surface soil moisture at scales from 1 h to 2 weeks. Journal of Hydrology, 2006, 325(1/4): 56-66.
- [39] Hu W, Shao M G, Han F P, Reichardt K. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land. Geoderma, 2011, 162(3/4): 260-272.
- [40] 叶文华. 甘肃民勤沙区土壤水分状况及其与治沙造林和农业生产的关系//地理集刊(第8号). 北京:科学出版社, 1963: 69-115.
- [41] 方正山,朱成珙,王伟康.甘肃民勤沙地水分初步研究//全国地理学术会议论文集(自然地理).北京:科学出版社,1962:24-29.
- [42] 俄有浩,汪杰,张锦春,李爱德.民勤水资源变化与林地水分条件变化关系研究.甘肃林业科技, 2001, 26(4): 19-23.