

# 毛乌素沙地南缘臭柏群落土壤水分空间分布特征

刘 姣, 艾 宁, 宗巧鱼, 郝宝宝, 李 阳, 强大宏, 刘长海

(延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 为对臭柏群落土壤水分空间分布特征进行初步研究, 以毛乌素南缘神木大保当镇臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)群落为研究对象, 选取 10 个样地利用环刀进行土壤取样, 通过土壤烘干法测出土壤含水量与蓄水量并进行分析。结果表明: (1) 在坡位影响下, 各样地间的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 含水量和蓄水量整体分别表现为沙丘下部 > 沙丘中部 > 丘间低地 > 沙脊, 沙丘中部 > 沙丘下部 > 丘间低地 > 沙脊; (2) 在坡向影响下, 各样地的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 含水量和蓄水量均表现为背风坡 > 迎风坡; (3) 在林内外植被影响下, 各样地的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 含水量和蓄水量均表现为草地 > 臭柏 > 沙地。表明臭柏群落对土壤水分空间分布有一定的影响。

**关键词:** 毛乌素沙地; 臭柏; 土壤含水量; 土壤蓄水量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0079-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.012

## Spatial Distribution Characteristics of Soil Moisture in *Sabina vulgaris* Ant. Community in the Southern Edge of Mu Us Sandland

LIU Jiao, AI Ning, ZONG Qiaoyu, HAO Baobao, LI Yang, QIANG Dahong, LIU Changhai

(Yan'an University School of Life Sciences, Yan'an, Shaanxi 716000)

**Abstract:** In order to study the spatial distribution characteristics of soil moisture in *Sabina vulgaris* Ant. community, this paper took the vegetation of *Sabina vulgaris* Ant. in the southern edge of Mu Us as the research object. Ten plots were selected and soil samples were taken by cutting ring. The soil moisture content and water storage were measured and analyzed by soil drying method. The following results were obtained: (1) There were significant differences among the soil moisture contents in the plots with different slope positions ( $P < 0.05$ ). Soil moisture content and water storage were lower of dune > middle dune > lowland among sandy dune > sand ridge, middle dune > lower of dune > lowland among sandy dune > sand ridge. (2) There were significant differences among soil moisture contents under different slopes ( $P < 0.05$ ). Both soil moisture content and water storage showed that leeward slope > windward slope. (3) There were significant differences among soil moisture contents under the influence of vegetation inside and outside the forest ( $P < 0.05$ ). Both soil moisture content and water storage were grassland > *Sabina vulgaris* Ant. > Sand. These results showed that *Sabina vulgaris* Ant. Community had certain influence on spatial distribution of soil moisture.

**Keywords:** Mu Us Sandland; *Sabina vulgaris* Ant.; soil moisture; water storage

毛乌素沙地地处半干旱区, 是土地沙化的前沿阵地, 更是防治土地沙化的关键区域。区域内土质退化, 流沙起伏, 水土流失问题严重<sup>[1]</sup>, 有研究<sup>[2]</sup>表明, 这是由于气候变化而非人类活动造成; 为遏制土地荒漠化和改善生态环境, 在沙地采取了治沙造林、封山育林、退耕还林还草、封闭禁牧、飞播造林、人工造林等植被恢复措施, 沙地大部分已成为了风沙草滩

区<sup>[1,3]</sup>。由于植物可以对沙漠化发展进行有效遏制, 减轻风沙危害, 促进局部地区生境恢复<sup>[4]</sup>, 因此, 在治沙工程中, 其南缘的陕西神木以臭柏为先锋树种, 大面积种植形成臭柏自然保护区。臭柏又名沙地柏, 生性耐干旱、严寒, 抗盐碱, 非常适合生长在干旱的沙漠地区, 臭柏根茎长且分枝多, 覆盖度可高达 90%, 能有效防风固沙并以此来防止沙丘流动<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2019-04-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501705); 国家自然科学基金项目(31370541)

第一作者: 刘姣(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事动物多样性与进化生态及修复生态研究。E-mail: 1528078108@qq.com

通信作者: 刘长海(1965—), 男, 教授, 主要从事修复生态研究。E-mail: yadxlch@yau.edu.cn

干旱缺水是制约植物的重要因素。而降水是毛乌素沙地土壤水分的主要补给源,土壤水分空间分布有水平变化、垂直变化、尺度效应 3 个特征,其除受降水特性的影响外,还受植被结构、土壤质地、蒸散发、土地利用、地形因子、土壤侵蚀、尺度的时空效应、多因子的综合等过程的影响<sup>[7-10]</sup>。土壤含水量的空间差异主要表现在不同植被类型之间,而不是坡位之间,地形对土壤水分的影响被植被类型的影响所掩盖;另外,土壤水分空间格局并不是瞬时状态,而具有明显的时间稳定性,不受降水影响<sup>[11]</sup>。土壤水分作为植物生存的基本生活因子,不仅影响植物的个体发育,更进一步决定着植物群落的类型、分布和植被动态<sup>[12]</sup>。土壤水分是气象、地形地貌、水文、植被、人为活动等多种因素共同的结果;其空间分布规律是黄土高原水资源分布和合理进行生态规划的重要依据,研究干旱与半干旱气候的黄土丘陵区土壤水分空间分布规律及其主导因子,对水土保持生态植被规划具有重要意义。植被建设和土地利用转换是人类活动改变区域土壤含水量水平的直接且有效手段<sup>[13-14]</sup>。而植被对水分的消耗又来自于土壤水分,且植物的代谢由蒸腾作用支配;不同植被的蒸腾作用不同,且同一植被在不同的生长阶段也是如此,因此耗水量也不一样<sup>[15]</sup>。杨越等<sup>[16]</sup>研究得出,人工恢复植被对沙地土壤特性具有一定的影响,沙地土壤物理性质改良效果显著,而沙地土壤化学性质改良效果不显著。

对于毛乌素沙地南缘的研究较多,主要集中在对樟子松、沙柳、柠条等这些植被,具体包括樟子松的引种适宜性和建群后对当地环境改良问题以及引种后林分结构特征、降雨截留能力、蒸腾耗水特性、林下土壤理化性质和其对土壤的粒度特征的影响等<sup>[17]</sup>;沙柳的生物学特性、生长发育规律、防风固沙效益、耐旱机理、光合生理、不同栽植密度人工沙柳的生长和土壤水分及其和生长季蒸散量变化等<sup>[18-19]</sup>;柠条林地土

壤渗透特性、土壤物理性质及其群落结构特征等方面<sup>[20-21]</sup>;但有关臭柏群落土壤水分的研究却鲜有报道。为研究该区域植被与水文关系,完善毛乌素地区土壤生态基础研究,本研究以神木大保当镇臭柏自然保护区的臭柏为研究对象,以期对半旱区生态环境治理提供基础支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况

陕西神木臭柏县级自然保护区位于神木市西北部风沙区,属于毛乌素沙地的南缘,为毛乌素沙地与黄土高原的过渡带,大部分为风沙草滩区,固定和半固定沙丘的面积较大。保护区周边与神木市大保当镇和锦界镇接壤。研究区位于自然保护区的大保当镇,地理坐标 110° 04′ 20″—110° 04′ 23″ E, 38° 41′ 53″—38° 41′ 56″ N,海拔高度 1 137~1 158 m,地表起伏不显著。该区气候属半干旱大陆性季风气候,年平均气温 7.0 ℃,年平均降水量 411 mm,年蒸发量达 1 420 mm,冬存干旱多大风。在这样的条件下,地带性草原植物群落很少进入,因此发育了一组适应于沙地特点的半隐域性植被,由沙生植物臭柏为主组成的沙地植被<sup>[1]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设计 于 2018 年 8 月,在臭柏保护区以土地利用方式为依据随机选取臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)丛、草地 2 种典型的植被恢复样地为研究对象,共选取了 10 个大小为 10 m×10 m 标准地,其中 1 个为沙地(样地 8),3 个为草地(样地 1,7,9),6 个为臭柏地(样地 2,3,4,5,6,10)。地理信息数据采用 GPS 进行记录,同时记录样地的植被类型、海拔、坡位、坡向、坡度和植物盖度等信息属性(表 1)。其中林内为有臭柏群落生长的样地,林外为裸露的沙地且没有任何植被覆盖的样地。

表 1 采样点基本情况

编号	植被类型	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	盖度/%
样地 1	草地(沙蒿、沙芦草、油蒿、狗娃花)	110°04′23″N,38°41′53″E	1146	0	背风坡	丘间低地	85
样地 2	臭柏	110°04′23″N,38°41′54″E	1150	8	无	沙脊	85
样地 3	臭柏	110°04′21″N,38°41′53″E	1137	0	背风坡	丘间低地	100
样地 4	臭柏	110°04′20″N,38°41′54″E	1158	0	无	沙脊	80
样地 5	臭柏	110°04′20″N,38°41′54″E	1146	42	背风坡	沙丘中部	90
样地 6	臭柏	110°04′20″N,38°41′54″E	1140	23	背风坡	沙丘下部	100
样地 7	草地(沙蒿、沙芦草、狗娃花)	110°04′20″N,38°41′55″E	1143	0	迎风坡	丘间低地	65
样地 8	沙地	110°04′20″N,38°41′54″E	1145	2	迎风坡	丘间低地	0
样地 9	草地(沙蒿、沙芦草、狗娃花)	110°04′20″N,38°41′56″E	1141	1	迎风坡	丘间低地	20
样地 10	臭柏	110°04′23″N,38°41′55″E	1146	33	背风坡	沙丘中部	20

1.2.2 样品采集 在各标准地内,随机选取 1 m×1 m 的区域进行采样。清理干净样方中植被后,挖 1 m×

1 m×1 m 的土坑,在 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 分别用直径为 6 cm 的环刀

进行土壤取样,每层用环刀各取 3 个土壤样,对于当天所采集的土样,用烘干法测定其土壤含水量。本次样品采集仅于 2018 年 8 月 2 日采集了 1 次,且天气晴好采样日近期也无降雨天气,因此,本试验结果受降雨影响不大。

土壤含水量计算公式为:

$$W = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\%$$

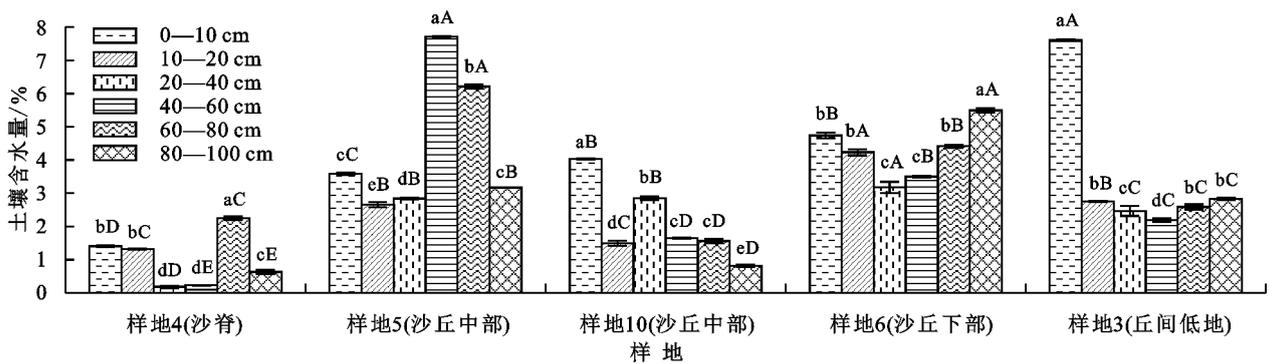
式中:W 为所测样品的土壤含水量(%);W<sub>1</sub>为烘干前土壤样品质量(g);W<sub>2</sub>为烘干后土壤样品质量(g)。

1.2.3 数据处理与分析方法 所有数据通过 Excel 软件进行整理,采用 SPSS 21 软件进行单因素方差分析,Origin 2015 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 臭柏群落土壤含水量空间分布特征

2.1.1 坡位对臭柏群落土壤含水量的影响 由图 1 可知,不同坡位影响下各样地土壤含水量在 0—100 cm



注:不同小写字母表示同一样地不同土层间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示不同样地同一土层间差异显著(P<0.05)。下同。

图 1 不同坡位植被土壤含水量

2.1.2 坡向对含水量的影响 由图 2 可知,在不同坡向影响下各样地的土壤含水量在 10—100 cm 存在显著性差异(P<0.05)。随着土层的加厚呈现出:样地 1(背风坡)在土层 0—100 cm 均呈上升趋势,在 80—100 cm 这一土层增长率最高;样地 7(迎风坡)为先降低(0—60 cm)后增加(60—80 cm)再降低(80—100 cm),在 0—100 cm 的土层中整体波动较大;样地 9(迎风坡)为先降低(0—40 cm)后增加(40—80 cm)再降低(80—100 cm),变化趋势与样地 7 一致;不同的是样地 9 整体的变化趋势较为平缓,这可能与 2 处样地植被覆盖度不同有关。从样地土层整体来看,不同坡向土壤含水量表现为背风坡(样地 1)>迎风坡(样地 7,9)。2 种坡向的含水量在土层为 0—80 cm 时相差不大,而在土层为 80—100 cm 是却相差较大;随着土层的加深呈现出相反趋势,即背风坡的含水量增加,而迎风坡却降低。

### 2.2 臭柏群落土壤蓄水量空间分布特征

2.2.1 坡位对臭柏群落土壤蓄水量的影响 由图 3 可知,在不同坡位下 0—100 cm 的土层深度中,土壤蓄

间存在显著性差异(P<0.05)。随着土层的加厚表现为:样地 4(沙脊)为先降低(0—40 cm)后上升(40—80 cm)再降低(80—100 cm);样地 5(沙丘中部,盖度 90%)为先降低(0—20 cm)后上升(20—60 cm)再降低(60—100 cm);样地 6(沙丘下部)为先降低(0—40 cm)再上升(40—100 cm),形成“U”形;样地 3(丘间低地)为先降低(0—60 cm)再平缓的上升(60—100 cm);样地 10(沙丘中部,盖度 20%)为先降低(0—20 cm)后上升(20—40 cm)再降低(40—100 cm)。各样地在 0—20 cm 土层土壤含水量波动较大,而 20—100 cm 除个别样地外波动较小。在不同坡位下,各样地土层整体植被含水量表现为沙丘下部(样地 6)>沙丘中部(样地 5)>丘间低地(样地 3)>沙脊(样地 4)。而样地 5 与样地 10 虽都为沙丘中部,但由于臭柏群落的盖度不同(样地 5>样地 10),从而样地 5 各土层的土壤含水量均大于样地 10,说明植被盖度也影响土壤的含水量。

水量表现为沙丘中部(样地 5)>沙丘下部(样地 6)>沙丘低地(样地 3)>沙脊(样地 4)。样地 5 和样地 10 同为沙丘中部,但由于样地 5 的臭柏群落盖度大于样地 10,所以,样地 5 的土壤蓄水量大于样地 10。由此可见,臭柏群落的盖度对土壤蓄水量也有影响。除样地 10 外,蓄水量最大为 60—80 cm 土层;除沙脊外,蓄水量最小为 10—20 cm 土层。

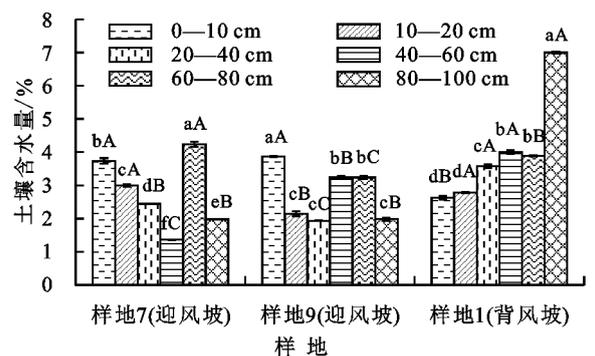


图 2 不同坡向植被土壤含水量

2.2.2 坡向对土壤蓄水量的影响 由图 4 可知,在不同坡向条件下 0—100 cm 的土层深度中背风坡蓄

水量大于迎风坡。背风坡蓄水量最大为 80—100 cm 土层;而迎风坡蓄水量最大为 60—80 cm 土层。背风坡随着土层深度的增加土壤蓄水量呈现出逐渐上升的趋势。

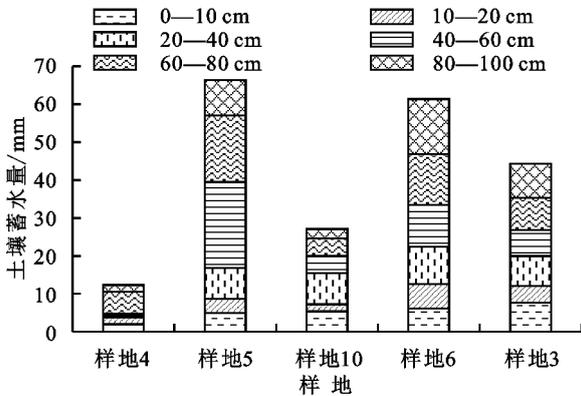


图 3 不同坡位植被土壤蓄水量

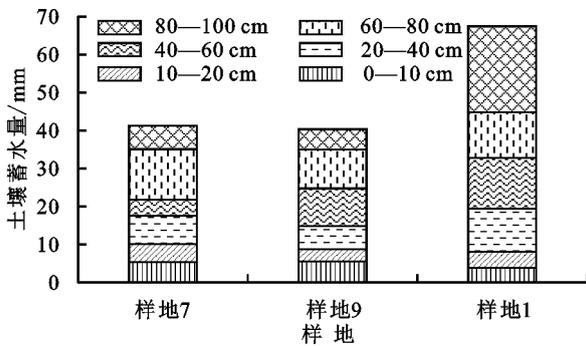


图 4 不同坡向植被土壤蓄水量

## 2.3 林内外植被土壤水分特征

2.3.1 林内外植被土壤含水量特征 由图 5 可知,林内外植被土壤含水量在 0—100 cm 间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。随着土层深度的增加呈现为样地 1 (草地)在土层 0—100 cm 均呈上升趋势;样地 3 (臭柏)先下降(0—60 cm)再上升(60—100 cm);样地 8 (沙地)整体呈增长趋势,但在 80—100 cm 这一土层为下降趋势。从样地土层整体来看,不同植被土壤含水量为草地>臭柏>沙地。

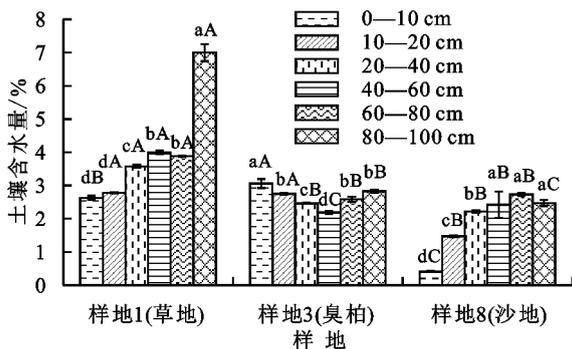


图 5 林内外植被土壤含水量

2.3.2 林内外土壤蓄水量特征 由图 6 可知,在林内外(林内为臭柏地,林外为沙地)条件下,0—100 cm 的土层深度中蓄水量表现为草地(样地 1)>臭柏(样地 3)>沙地(样地 8);草地与臭柏这 2 种植被蓄

水量均在 80—100 cm 土层最大,沙地蓄水量在 60—80 cm 土层最大,但在 80—100 cm 土层与其差距不大;臭柏各土层之间蓄水量较为均匀,沙地在 0—80 cm 随着土层深度的增加蓄水量升高,80—100 cm 土层稍有降低。

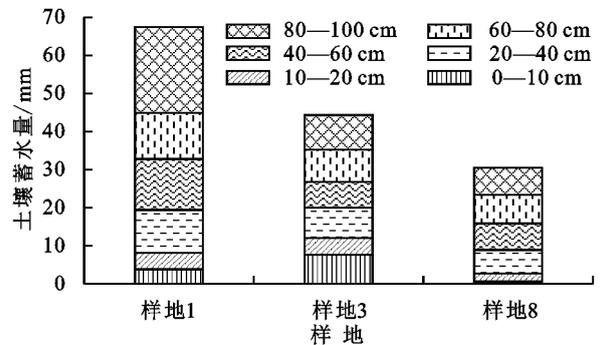


图 6 林内外植被土壤蓄水量

## 3 讨论

土壤水分环境的改善对黄土高原的植被恢复与重建有着至关重要的作用<sup>[22]</sup>。有研究<sup>[23]</sup>表明,沙丘底部土壤含水量最高,丘顶最低,这与本研究得出结果相符;姚毓菲<sup>[24]</sup>研究表明,杏树地与柠条地在 0—20 cm 的土层时不同坡位土壤含水量相差不大,但在 20—100 cm 的土层时分别为坡上大于坡中和坡下、坡上和坡中大于坡下,这与本研究各样地在 0—20 cm 土层土壤含水量差异较大,而 20—100 cm 除个别样地外差异不大,产生这一现象的原因可能是与植被类型不同有关。杜峰等<sup>[12]</sup>提出,从影响土壤水分含量与变异量的气象、地形、植被和土壤因素来看,在其他因素相同的情况下,地形因素主要是地形(坡度、坡向和海拔)影响水分的再分配。另有研究<sup>[25-26]</sup>表明,从坡顶到坡脚土壤含水量依次增加,但是在某种特殊情况下也会发生变化,同时基于土壤水分的垂直变化规律,陡坡的土壤水分存在着弱利用层、土壤水分利用层、土壤水分调节层分别为 0—40, 40—60, 60—100 cm,所以,本研究得出,不同坡位下土壤含水量表现为沙丘下部>沙丘中部>丘间低地>沙脊。符超峰等<sup>[27]</sup>得出,在灌木覆盖下的沙丘含水量为迎风坡>背风坡,而本研究仅在 0—10 cm 土层与其相同,在 10—100 cm 结果相反。王志等<sup>[28]</sup>得出的夏季由于地表出现干沙层,故迎风坡水分高于背风坡。这可能是由于土壤含水量的差异,不仅由气候、地形等客观因素决定,还由不同植物水分利用的生物学特性的反映<sup>[29]</sup>所造成;本研究样地是在同一气候、地形条件下选择的,因此前者对此影响不大,主要是由后者造成的。由于柠条靠庞大的根系吸收土壤水分以及强烈的蒸腾作用,使得其在干旱的土地上生存,因此土壤水分明显低于其他几种土地利用类型<sup>[30]</sup>,臭柏与

柠条同样是耐干旱且拥有庞大的根系;张国盛等<sup>[31]</sup>得出臭柏的蒸腾速率表现为8月最高,所以草地土壤含水量高于臭柏。

土壤蓄水量反映了土壤调节和贮蓄水分的能力,同时能够综合反映植被根系对土壤剖面结构的影响,是进行植被恢复和重建工程的理论依据;它是通过各种孔隙度结合土层厚度来体现的<sup>[32-34]</sup>。植被通过改善土壤孔隙状态来提高土壤的蓄水能力,但植被类型不同,提高蓄水的的功能也不同<sup>[35]</sup>。不同坡位样地土壤在0—100 cm饱和蓄水量的顺序与土壤总孔隙度表现出相似的规律<sup>[36]</sup>。灌木林地与荒漠的土壤质地疏松,持水能力差,加之水分来源少,在0—100 cm的土层厚度范围内,平均土壤蓄水量不足100 mm<sup>[37]</sup>,所以本研究中无论是空间分布(坡位、坡向)还是植被影响下得出的蓄水量的值均不超过70 mm。林内外植被类型影响下土壤蓄水量为草地(67 mm) > 臭柏(44 mm) > 沙地(31 mm),由于撂荒地均无植被覆盖,因此这与赵世伟等<sup>[22]</sup>得出撂荒地的土壤蓄水量最小,草地和灌木地的土壤蓄水量有所提高的结论相同。综上,可说明臭柏对土壤有一定的改善作用,并且这种改善还会持续下去;臭柏土壤剖面各层之间的蓄水量波动不大,这也说明其庞大的根系对土壤剖面产生了一定的作用,也可能是因为臭柏的根系在0—100 cm土层对水分的利用率较草地更高。

臭柏群落由油蒿群落演替而来,是沙生演替中最高、最稳定的代表类型之一,形成顶极植物群落,臭柏灌丛耐沙埋、耐脊薄,天然群落的根系随沙丘高度而变化,沙丘顶部群落的抗旱性增强。因此,应在半流动沙地上迎风坡主风垂直方向上窄带或背风坡上宽带布设(一般为10 m)的沙障内栽植<sup>[38]</sup>。

## 4 结论

(1)在坡位影响下各样地的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),含水量和蓄水量整体分别表现为沙丘下部 > 沙丘中部 > 丘间低地 > 沙脊,沙丘中部 > 沙丘下部 > 沙丘低地 > 沙脊。

(2)在坡向影响下各样地的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),含水量和蓄水量均表现为背风坡 > 迎风坡。

(3)在林内外植被影响下各样地的土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),含水量和蓄水量均表现为草地 > 臭柏 > 沙地。

### 参考文献:

[1] 高学斌,任毅.陕西神木臭柏县级自然保护区综合科学考察报告[M].西安:陕西科学技术出版社,2018.  
[2] Wang X, Chen F H, Dong Z, et al. Evolution of the southern Mu Us Desert in north China over the past 50

years: An analysis using proxies of human activity and climate parameters [J]. *Land Degradation and Development*, 2005, 16: 351-366.

- [3] 杨越, 哈斯, 孙保平, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被恢复类型的土壤养分效应[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10): 37-42.  
[4] Le H H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(1): 3-14.  
[5] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J]. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1-16.  
[6] 张兵. 主要防风固沙植物及其应用价值[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2012, 35(5): 62-65.  
[7] Veste M, Yair A, Breckle S W, et al. Ecohydrology of biological soil crusts in arid sand dunes-integration from the microscale to the landscape [J]. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2010, 14: 4142.  
[8] Wang X P, Zhang Y F, Wang Z N, et al. Influence of shrub canopy morphology and rainfall characteristics on stemflow within a revegetated sand dune in the Tengger Desert, NW China [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(10): 1501-1509.  
[9] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau) part I: Effects on soil water and plant water uptake [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 60(4): 547-566.  
[10] 李亚龙. 土壤水分时空分布研究进展[J]. *中国农村水利水电*, 2008(12): 30-34.  
[11] 姚雪玲, 傅博杰, 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[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.  
[12] 杜峰, 山仑, 梁宗锁, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替过程中的土壤水分效应[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 669-678.  
[13] 傅子洵, 王云强, 安芷生. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同植被类型下土壤水分动态特征[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 188-194.  
[14] 郭美丽, 焦峰, 薛超玉. 黄土丘陵区土壤水分空间分布与环境因子的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 47-55.  
[15] 王辉, 高守波, 刘郁玲, 等. 我国北方主要造林树种耗水特性及抗旱造林技术[J]. *园林生态*, 2016(12): 101.  
[16] Yang Y, Sun Hong, Han Y J, et al. Effects of artificial vegetation restoration on soil physicochemical properties in southern edge of Muls Sandy Land [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2014, 15(14): 648-652, 691.  
[17] 马成忠, 邓继峰, 丁国栋, 等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. *水土保持*

- 持学报, 2017, 31(1): 230-235.
- [18] 安慧, 王俊波, 安钰. 灌丛密度对毛乌素沙地南缘沙柳生长及土壤水分动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 197-203.
- [19] 安慧, 安钰. 毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2247-2252.
- [20] 刘凯, 王磊, 宋乃平, 等. 毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 89-94.
- [21] 王占军, 蒋齐, 潘占兵, 等. 宁夏毛乌素沙地不同密度柠条林对土壤结构及植物群落特征的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 31-32, 35.
- [22] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1389-1392.
- [23] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1612-1619.
- [24] 姚毓菲. 黄土高原坡面植被恢复中植物冠幅及细根对土壤理化性质的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [25] 郝振纯, 吕美霞, 吕美朝, 等. 坡度作用下土壤水分时空异质性研究[J]. 水文, 2012, 32(2): 5-10, 48.
- [26] 赵磊磊, 朱清科, 聂立水, 等. 陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J]. 地球环境学报, 2012, 21(2): 253-259.
- [27] 符超峰, 赵景波. 毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 377-383.
- [28] 王志, 王蕾, 刘连友, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘水分的时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 61-65.
- [29] 张健, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区植被次生演替灌木初期土壤物理性质特征[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 101-109.
- [30] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 84-91.
- [31] 张国盛, 王林, 董智, 等. 毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(1): 7-12.
- [32] 景观阳, 邸利, 王安民, 等. 甘肃泾川不同林龄人工刺槐林的土壤水分—物理特性及渗透性研究[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(2): 193-198.
- [33] 白一茹, 邵明安. 黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 45-50.
- [34] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 32(4): 133-138.
- [35] 何恺文, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 2 种草本植物根系对长汀县崩岗洪积扇土壤水分状况的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 25-34.
- [36] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山北侧华北落叶松林土壤水文调节功能的坡位差异[J]. 四川农业大学学报, 2017, 3(4): 509-515.
- [37] 张帅普, 邵明安, 李丹凤. 绿洲—荒漠过渡带土壤蓄水量的空间分布及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2509-2516.
- [38] 王鸣远, 关三和, 王义. 毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(2): 37-43.

(上接第 78 页)

- [19] 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181-1188.
- [20] 王薇, 孟杰, 虎胆·吐马尔白. RETC 推求土壤水动力学参数的室内试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(1): 99-102, 106.
- [21] 魏义长, 刘作新, 康玲玲. 辽西淋溶褐土土壤水动力学参数的推导及验证[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 81-86.
- [22] 陈俊英, 刘畅, 张林, 等. 斥水程度对脱水土壤水分特征曲线的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 188-193.
- [23] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 18-24.
- [24] 葛松华, 唐亚明. 大学物理实验教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 3.
- [25] Chaudhari S K, Somawanshi R B. Effect of water quality on moisture retention characteristics of different texture soils[J]. Journal of Maharashtra Agricultural Universities, 2000, 25(2): 128-133.
- [26] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 484-494.
- [27] 杨芳, 段惠敏, 段建军, 等. 温度对黑色石灰土原土及不同粒径土壤颗粒有机碳矿化的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(2): 68-76.
- [28] 尚慢廷, 张建云, 刘九夫, 等. 大孔隙对土壤比水容重及非饱和导水率影响的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 1-5.
- [29] 郭全恩, 王益权, 车宗贤, 等. 温度及矿化度对土壤持水性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 52-55.
- [30] 陈宸, 张泮, 张华, 等. 温度效应对粉砂土壤水分特征曲线的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 173-176, 181.
- [31] 任荣, 马娟娟, 郑利剑, 等. 蓄水坑灌水土温度变化对土壤水分再分布规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 39-46.