

# 不同降水对荒漠灌丛土壤理化性质和地表植被分布的影响

郭志霞<sup>1</sup>, 刘任涛<sup>2</sup>, 冯永宏<sup>1</sup>, 王文帆<sup>1</sup>, 蒋嘉瑜<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** [目的] 揭示荒漠灌丛土壤理化性质及地表草本分布特征对降水分布变化的响应, 为干旱风沙区人工植被建设模式选择、沙漠化防治及未来应对气候变化提供依据。[方法] 在榆林市榆阳区、盐池县、沙坡头保护区, 以共有人工栽植灌丛柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)为研究对象, 以灌丛外裸地为对照, 测定了灌丛内外微生境中土壤含水量、容重、pH 值、电导率、全碳、全氮及土壤粒径含量, 并调查了灌丛内外微生境地表草本植被分布特征。[结果] ① 榆阳研究区柠条灌丛显著提高土壤粗沙粒含量、草本植物个体数, 降低土壤容重、土壤 pH 值; 油蒿灌丛显著提高土壤黏粉粒含量、全碳、全氮( $p < 0.05$ ), 降低草本植物物种数。盐池研究区柠条灌丛增加土壤全碳、全氮、草本植物高度, 降低土壤细沙粒含量、土壤容重、草本植物物种数; 油蒿灌丛降低土壤黏粉粒含量、草本植物物种数。沙坡头研究区柠条灌丛降低土壤电导率; 油蒿灌丛下无草本植物。② 从沙坡头到榆阳区, 随降水量增加, 灌丛微生境土壤细沙粒含量、土壤容重和土壤电导率降低, 而土壤养分相对增加, 草本植物物种数、个体数、高度均相对增加。[结论] 荒漠区造林策略取决于灌丛种类和降水分布。榆阳研究区栽植柠条和油蒿灌丛、盐池研究区栽植柠条灌丛、沙坡头研究区栽植柠条灌丛更有利于促进沙漠化治理与固沙林地土壤—植被系统恢复。

**关键词:** 荒漠区; 灌丛; 土壤理化性质; 地表草本植被; 降水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0056-10

中图分类号: Q948.1

**文献参数:** 郭志霞, 刘任涛, 冯永宏, 等. 不同降水对荒漠灌丛土壤理化性质和地表植被分布的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 56-65. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.009; Guo Zhixia, Liu Rentao, Feng Yonghong, et al. Effects of different precipitation on soil properties and ground vegetation distribution in desert shrub microhabitats [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 56-65.

## Effects of Different Precipitation on Soil Properties and Ground Vegetation Distribution in Desert Shrub Microhabitats

Guo Zhixia<sup>1</sup>, Liu Rentao<sup>2</sup>, Feng Yonghong<sup>1</sup>, Wang Wenfan<sup>1</sup>, Jiang Jiayu<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in

Northwest China, ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The distribution of soil physical and chemical properties and herbaceous vegetation among desert shrub microhabitats and their responses to precipitation change were studied to provide a basis for artificial afforestation and desertification control under future climate change in arid desertified regions. [Methods] The afforested shrubs, including *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica*, were selected as research objects. The microhabitats inside and outside shrub canopies were set as sampling sites. At each sampling site, soil water content, bulk density, pH value, electrical conductivity, total carbon, total nitrogen,

收稿日期: 2020-08-19

修回日期: 2020-09-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“腾格里沙漠固沙造林后植被恢复对土壤节肢动物多样性分布的影响”(41867005), “荒漠灌丛对土壤动物的“聚集—扩散”效应”(41661054); 宁夏青年拔尖人才培养工程项目“国家级学术技术带头人”人才培养(RQ0010); 宁夏自然科学基金“荒漠蚂蚁群落与植物间的互作关系对固沙造林生态恢复的影响”(2020AAC02014)

第一作者: 郭志霞(1995—), 女(汉族), 山西省吕梁市, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 13753447471@163.com。

通讯作者: 刘任涛(1980—), 男(汉族), 河南省邓州市, 博士/博士后, 研究员, 硕士生导师, 主要从事恢复生态相关研究与教学工作。Email: nxuliut2012@126.com。

and soil particle size were measured, and the distribution of herbaceous vegetation was investigated, along with the climatic gradient, in the Yuyang, Yanchi, and Shapotou areas. [Results] ① In Yuyang area, soil coarse sand content and herbaceous abundance significantly increased, while the soil bulk density and soil pH value decreased in the *C. korshinskii* shrub microhabitats relative to the open space. Soil clay content, total carbon, and total nitrogen significantly increased, while herbaceous abundance declined in the *A. ordosica* shrub microhabitats relative to the open space. In Yanchi area, soil total carbon, total nitrogen, and herbaceous plant height increased, while soil fine sand content, soil bulk density, and herbaceous species richness decreased in the *C. korshinskii* shrub microhabitats relative to the open space. Soil clay content and herbaceous species richness decreased in the *A. ordosica* shrub microhabitats relative to the open space. In Shapotou area, soil electrical conductivity decreased in the *C. korshinskii* shrub microhabitats, while there were no herbaceous plants observed in *A. ordosica* shrub microhabitats relative to the open space. ② Along with the increase in the precipitation amount from the Shapotou area toward the Yuyang area, soil fine sand content, soil bulk density, and soil electrical conductivity decreased, while soil nutrients and herbaceous species richness, abundance, and height increased. [Conclusion] The afforestation strategies in desertified regions depended on shrub species and the precipitation distribution. *C. korshinskii* and *A. ordosica* shrubs afforested in Yuyang, *C. korshinskii* shrubs afforested in Yanchi, and *C. korshinskii* shrubs afforested in Shapotou could be an option for the recovery of soil-vegetation systems in desertified regions.

**Keywords:** desertified region; shrub; soil properties; herbaceous vegetation; precipitation

在中国干旱、半干旱地区,由于不合理的人类活动以及气候变化,导致荒漠化极速扩张,生态退化、环境恶化,严重威胁到人类社会的生存及可持续发展<sup>[1]</sup>。人工灌木林的建植在沙漠化防治及土壤改良中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。由于柠条、油蒿具有极强的生命力和抗逆性,具有防风固沙等生态功能,被认为是北方干旱、半干旱区进行防风固沙区的常用树种,得到大面积推广应用<sup>[3]</sup>。随着灌丛林的建植与发育,群落结构由单一的灌木、半灌木组成演变成一年生草本逐渐占优势的复杂灌草复合系统<sup>[4]</sup>。并且,灌丛通过遮荫和增加地表粗糙度来改变植被区的微气候、土壤理化性质,同时微生境改善又为近地面种子萌发、种子库维持、植物定居和生长提供适宜环境<sup>[4]</sup>。因此,研究人工固沙灌木林土壤理化性质和地表植被的变化规律,可以反映人工灌木林的固沙效果及对土壤—植被系统恢复的生态作用。

研究表明,植物覆盖的土壤颗粒较细,含有较高的碳、氮含量<sup>[3]</sup>,同时不同生境下土壤资源的积累、分布、循环与植物分布密切相关<sup>[5]</sup>。牛西午等<sup>[6]</sup>在山西西北部荒漠区研究柠条对土壤理化性质的影响,发现柠条可以改善土壤物理性状,提高土壤酶活性、有机质和全氮含量,从而改善土壤肥力。杨刚等<sup>[7]</sup>在宁夏盐池荒漠草原研究区发现柠条灌丛种植后植物种类减少,尤其是营养价值高的豆科和禾本科牧草种类减少较多。在毛乌素沙地东南缘植被恢复过程中,研究发现柠条和紫穗槐两种灌丛下植物群落总丰富度均

显著高于沙柳灌丛<sup>[8]</sup>。在荒漠化防治过程中,灌丛作为荒漠生态系统的主要景观调剂器<sup>[9]</sup>,不同的灌丛对许多资源有不同的调节作用,这将在很大程度上导致形成不同的资源斑块格局,进而调控地面植被的资源分配和植被物种的组合和性能<sup>[10]</sup>。综合分析发现,已有研究集中于不同天然灌丛或人工灌丛对土壤—植被系统的影响方面,但在不同降水分布区背景下,荒漠区不同灌丛如何对土壤与植被系统产生生态作用及差异,报道较少。目前,不同降水研究区柠条、油蒿灌丛对土壤植被系统生态作用的影响及差异,尚不清楚。

研究表明,荒漠区柠条、油蒿灌丛人工林建设对于促进沙化土壤环境改善、植被恢复及防沙治沙具有重要的生态作用。并且,不同降水分布区条件的差异,可能将直接影响到这 2 种荒漠灌丛的生态效应。鉴于此,本研究在毛乌素沙地和腾格里沙漠选择 3 个研究区,以研究区共有的人工灌丛柠条和油蒿为研究对象,以灌丛周围裸露地为对照,通过调查灌丛内外微生境中土壤性质和地表植被特征,旨在阐明不同降水分布条件下荒漠灌丛对土壤—植被系统的恢复效果及其差异性,为干旱风沙区人工植被建设模式选择、沙漠化防治及未来应对气候变化提供依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究样地分别位于陕西榆林市榆阳区、宁夏回族

自治区吴忠市盐池县和中卫市沙坡头区境内。本研究样地属于宁夏大学荒漠生态学研究组长期固定样地(建设期 30 a)。陕西省榆林市榆阳区位于毛乌素沙地东南缘(38°19′18″N,109°41′9″E,平均海拔 1 079 m),宁夏回族自治区吴忠市盐池县位于毛乌素

沙地西南缘(37°49′13″N,107°27′30″E,平均海拔 1 348 m),宁夏中卫市位于腾格里沙漠东南缘(37°26′32″N,104°46′21″E,平均海拔 1 322 m)。3 个研究区域均属于温带大陆性气候,基本气候条件与土壤类型情况见表 1 和张安宁等<sup>[11]</sup>研究。

表 1 研究区基本气候条件与土壤类型概况

研究区	年平均气温/ ℃	年降雨量/ mm	潜在蒸散量/ mm	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	土壤类型		地带性 植被
					地带性	非地带性	
榆阳	8.7	411.1	1192	2.7	灰褐土	风沙土	荒漠化草原
盐池	8.5	281.7	1120	2.8	黄绵土与灰钙土	风沙土	荒漠化草原
沙坡头	9.2	184.1	1235	2.9	灰漠土与棕钙土	风沙土	草原化荒漠

榆阳研究区的主要植被包括小叶杨(*Populus simonii*)、旱柳(*Salix matsudana*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)<sup>[12]</sup>。盐池研究区主要植被包括柠条、油蒿(*Artemisia ordosica*)等<sup>[13]</sup>。沙坡头研究区主要天然植被包括花棒、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)为主,人工固沙造林中栽植灌丛柠条、油蒿、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)等<sup>[14]</sup>。

## 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 于 2019 年 9 月,在 3 个试验研究区,分别选取 5 株高度、大小且长势一致的柠条、油蒿灌丛,作为标准株进行标记(用防水标签、红色条幅做标记),以灌丛外裸地作为空白对照,共获得 48 调查样点:3 研究区×(2 灌丛×5 重复+6 裸地)。相邻样点之间至少间隔 20 m 以上。柠条灌丛高度为 126.67±1.41 cm,冠幅大小为 158.07±3.00 cm,叶面积指数为 89.90±4.96;油蒿灌丛高度为:71.33±1.81 cm,冠幅大小为 122.87±3.03 cm,叶面积指数大小为:85.562±4.5。

1.2.2 草本植被调查 在每个调查样点下,布设面积为 0.5 m×0.5 m 的样方 1 个。记录植物个体数(株/m<sup>2</sup>),测定植被高度(cm),统计植物物种数。

1.2.3 土壤样品采集、测定 在每个调查样点下,用土壤环刀(100 ml)取一个新鲜原状土壤样品,测定土壤容重。同时,在每个调查样点按照五点取样法取 0—10 cm 的表层混合土样 1 个,带回实验室。其中,取 1/4 混合土样测定土壤含水量;余下 3/4 土样置于室内,在自然状态下风干至恒重,最后过 2 mm 筛,移除石块、叶片和草根等杂质,用于相关土壤理化性质

分析。主要测定指标包括土壤粒径组成、土壤含水量、容重、pH 值、电导率、全碳、全氮。

土壤含水量(%)和土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)采用烘干称重法进行测定。土壤机械组成(%)采用英国马尔文公司的 Mastersizer 2 000(英国)激光粒度仪测定。根据美国农业部(USDA)制土壤质地分级标准划分土壤质地:黏粉粒(<0.05 mm)、细沙粒(0.05~0.25 mm)、粗沙粒(>0.25 mm)<sup>[15]</sup>。土壤 pH 值(水土比悬液为 2:1)和土壤电导率(水土比浸提液为 5:1,μS/m)用 P4 多功能测定仪器(Multi-line P4 Universal Meter,WTM 公司,Germany)测定。土壤全碳(g/kg)采用元素分析仪(意大利 DK6,UDK140 分析仪)测定,土壤全氮(g/kg)用凯氏定氮法(意大利 DK6,UDK140 分析仪)测定,具体测定方法参照参考文献<sup>[16]</sup>。

## 1.3 数据处理与分析

采用 Jaccard 相似性系数来分析不同微生境间草本植物群落的相似性,公式为:

$$q = \frac{C}{A+B-C} \quad (1)$$

对 3 个研究区不同灌丛微生境下地表草本物种数、个体数、高度进行统计分析。

计算群落间的相似性系数<sup>[17]</sup>,式中:A,B 分别为 2 个微生境下植物种数,C 为 2 个微生境共有物种数。根据 Jaccard 相似性系数的原理,当 q 为 0.00~0.25 时为极不相似,q 为 0.25~0.50 时为中等不相似,q 为 0.50~0.75 时为中等相似,q 为 0.75~1.00 时为极相似<sup>[18]</sup>。

富集率(enrichment ratio,E),又叫相对响应比率(Relative response ratio,RR)<sup>[2]</sup>

$$E(RR) = A/B \quad (2)$$

式中:A 为灌丛内平均值;B 为灌丛外平均值。其中,

当  $B=0$ , 而  $A \neq 0$  时, 该公式将无表达意义;  $E(RR)$  不存在; 当  $B \neq 0$ , 而  $A=0$  时;  $E(RR)=0$ ; 当  $A=B$  时;  $E(RR)=1$ ; 当  $B > A$  时;  $E(RR) < 1$ ; 当  $B < A$  时;  $E(RR) > 1$ , 表示灌丛对土壤养分具有富集作用<sup>[2]</sup>。

用 SPSS 22 软件进行统计分析。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA)、双因素方差分析 (two-ways ANOVA)、Duncan 方差分析方法比较不同数据间的差异。采用 Pearson 法和多元逐步回归分析方法对地面植物群落、环境因子间进行相关分析。

表 2 研究区和灌丛微生境对土壤理化性质的双因素方差分析

项目	土壤含水量	土壤容重	土壤 pH 值	土壤电导率	土壤全碳	土壤全氮	土壤 C/N	土壤黏粉粒	土壤细沙粒	土壤粗沙粒
研究区	13.70*	8.15*	295.56*	107.74*	117.84*	62.38*	206.66*	186.08*	188.65*	4.43*
灌丛微生境	0.16	2.36	5.65*	1.34	4.93*	12.45*	9.17*	4.49*	4.62*	0.71
研究区×微生境	0.44	1.83	6.43*	1.66	6.34	7.59*	4.65*	11.57*	11.56*	0.71

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ 。下同。

2.1.1 土壤粒径组成 整体来看, 沙坡头研究区 3 种微生境中土壤粒径分布仅有土壤细沙粒, 而不含土壤黏粉粒和土壤粗沙粒。但榆阳和盐池研究区 3 种微生境中土壤粒径分布包括土壤黏粉粒、土壤细沙粒和土壤粗沙粒, 并且以土壤细沙粒为主要成分。

由图 1 可知, 榆阳研究区土壤黏粉粒表现为油蒿最高, 裸地次之, 而柠条最低; 盐池研究区土壤黏粉粒表现为柠条最高, 裸地次之, 而油蒿最低。并且在柠条、裸地微生境中, 土壤黏粉粒含量为盐池研究区显著高于榆阳研究区 ( $p < 0.05$ ), 但油蒿微生境中 2 个研究区间无显著差异。

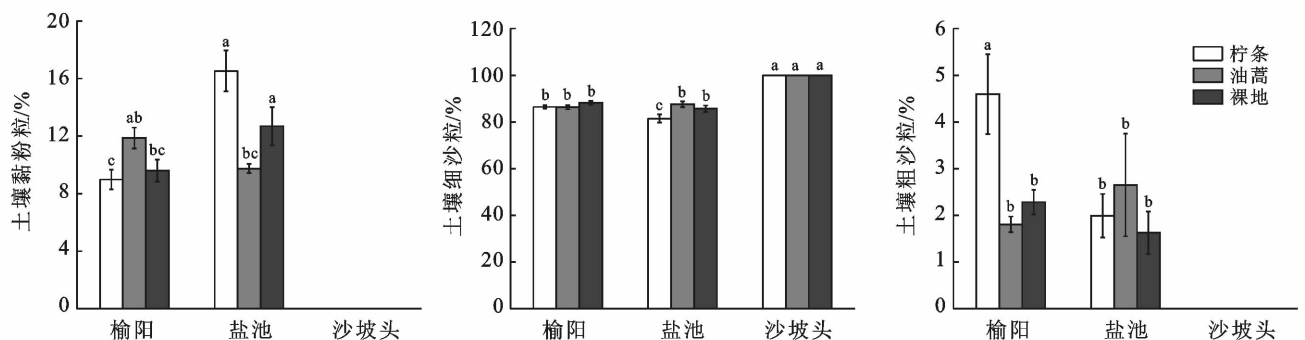
## 2 结果与分析

### 2.1 灌丛微生境土壤理化性质

由表 2 可知, 土壤黏粉粒、粗沙粒含量既受到研究区的影响 ( $p < 0.05$ ), 亦受到研究区与微生境共同作用的影响 ( $p < 0.05$ )。土壤细沙粒、土壤全碳和全氮含量均受到微生境和研究区的显著影响, 同时亦受到二者共同作用的影响。土壤含水量和土壤电导率则仅受到研究区的显著影响。

由图 1 可知, 榆阳、沙坡头研究区土壤细沙粒含量表现为不同微生境间均无显著差异, 盐池研究区土壤细沙粒含量则表现为柠条显著低于油蒿和裸地 ( $p < 0.05$ )。3 种微生境中土壤细沙粒含量均表现为沙坡头研究区显著高于榆阳研究区和盐池研究区 ( $p < 0.05$ )。

由图 1 可知, 榆阳研究区土壤粗沙粒含量表现为柠条显著高于油蒿和裸地, 而盐池研究区土壤粗沙粒含量在 3 种微生境间无显著差异性。并且, 柠条灌丛微生境土壤粗沙粒含量表现为榆阳研究区显著高于盐池研究区, 而油蒿灌丛和裸地微生境在 2 个研究区间均无显著差异。



注: 不同小写字母表示不同微生境的差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同灌丛微生境土壤粒径分布

2.1.2 土壤含水量和土壤容重 由图 2 可知, 3 个研究区土壤含水量均表现为 3 种微生境间无显著差异。在 3 种微生境中土壤含水量均表现为盐池研究区显著高于沙坡头研究区, 而榆阳研究区居中。

由图 2 可知, 榆阳研究区土壤容重表现为油蒿最

高, 裸地次之, 而柠条最低; 盐池、沙坡头研究区土壤容重表现为 3 种微生境间无显著差异。并且, 柠条和裸地微生境土壤容重均表现为沙坡头研究区最高, 盐池研究区次之, 而榆阳研究区最低, 而在油蒿微生境土壤容重表现为 3 个研究区间无显著差异。

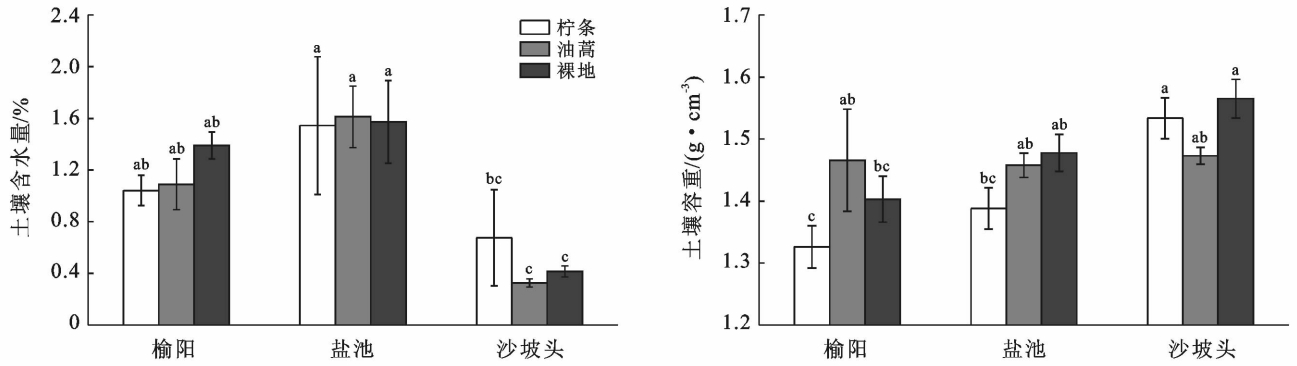


图 2 不同灌丛微生境土壤含水量和容重

2.1.3 土壤 pH 值和电导率 由图 3 可知,榆阳研究区土壤 pH 值表现为油蒿和裸地显著高于柠条( $p < 0.05$ );盐池、沙坡头研究区土壤 pH 值均表现为 3 种微生境间无显著差异。3 种微生境土壤 pH 值均表现为盐池、沙坡头研究区显著高于榆阳研究区( $p < 0.05$ )。

由图 3 可知,榆阳、盐池研究区土壤电导率在 3 种微生境间均无差异性;沙坡头研究区土壤电导率表现为油蒿最高,裸地次之,而柠条最低。3 种微生境土壤电导率均表现为沙坡头和盐池研究区显著高于榆阳研究区( $p < 0.05$ )。

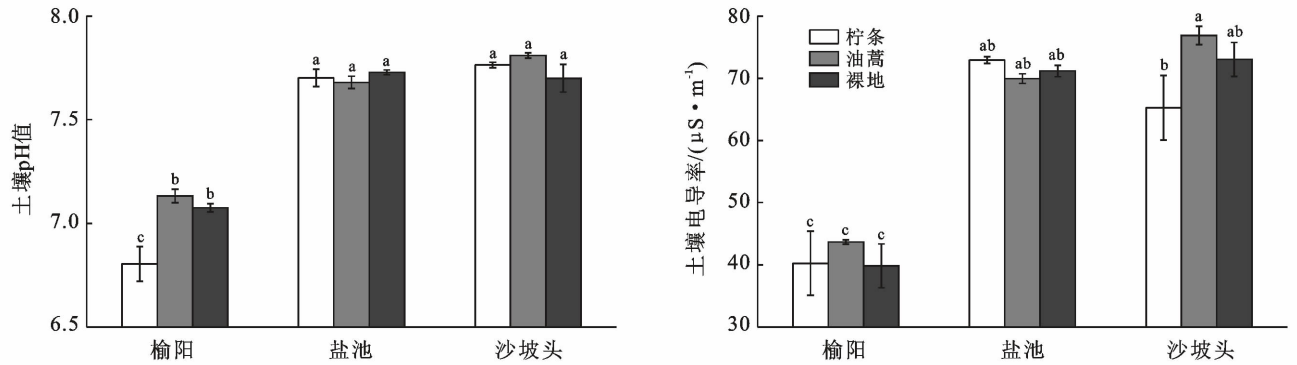


图 3 不同灌丛微生境土壤 pH 值和电导率

2.1.4 土壤全碳、全氮 由图 4 可知,榆阳研究区土壤全碳表现为油蒿显著高于柠条和裸地( $p < 0.05$ );盐池研究区土壤全碳表现为柠条高于油蒿和裸地

( $p < 0.05$ );沙坡头研究区 3 种微生境间无显著差异。并且,3 种微生境土壤全碳均表现为盐池研究区最高,榆阳研究区次之,而沙坡头研究区最低。

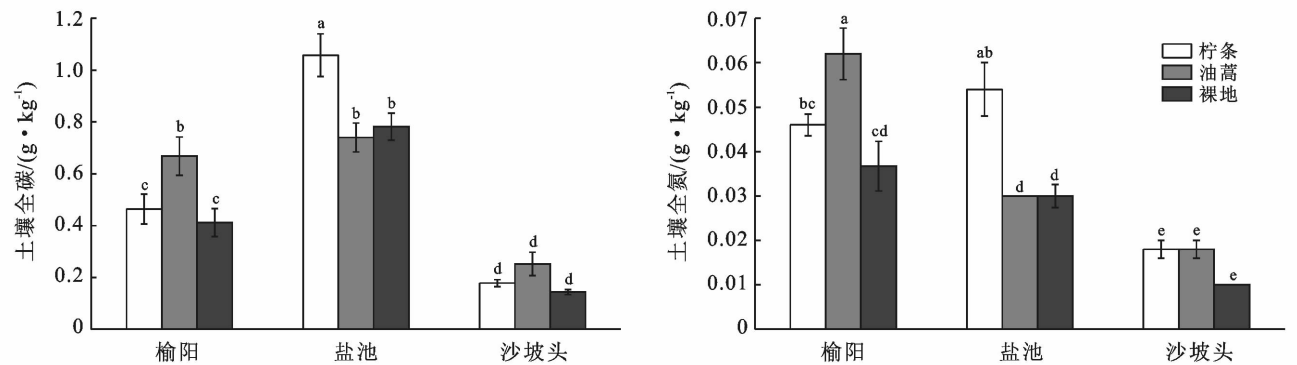


图 4 不同灌丛微生境土壤全碳、全氮

从图 4 可知,榆阳研究区土壤全氮表现为油蒿显著高于柠条和裸地( $p < 0.05$ );盐池研究区土壤全氮

表现为柠条显著高于油蒿和裸地( $p < 0.05$ );沙坡头研究区 3 种微生境间无显著差异。并且,柠条微生境

土壤全氮表现为盐池最高,榆阳次之,而沙坡头最低;油蒿和裸地微生境土壤全氮均表现为榆阳研究区最高,盐池研究区次之,而沙坡头研究区最低。

2.1.5 灌丛微生境土壤属性的富集率 土壤属性的富集程度可用土壤富集率表示。由表 3 看出,在不同降水研究区柠条、油蒿灌丛下土壤属性均表现出不同

程度的富集。在榆阳、沙坡头研究区油蒿灌丛对土壤细沙粒、全碳的富集要高于柠条灌丛;盐池研究区柠条灌丛对土壤黏粉粒、细沙粒、土壤全碳、全氮的富集要高于油蒿灌丛。柠条灌丛微生境下对土壤黏粉粒、细沙粒、粗沙粒、全碳富集最高为盐池研究区,油蒿灌丛微生境下对土壤细沙粒、全碳、全氮富集最高为沙坡头研究区。

表 3 研究区不同降水灌丛下土壤属性的富特征

研究区	灌丛	黏粉粒	细沙粒	粗沙粒	pH 值	全碳	全氮
榆阳	柠条	0.94	0.73	1.04	0.96	1.12	1.25
	油蒿	1.24	1.34	0.94	1.01	1.63	1.5
盐池	柠条	1.3	1.24	0.87	1	1.36	1.67
	油蒿	0.77	0.8	1.11	0.99	0.95	1
沙坡头	柠条	—	1.03	—	1.01	1.29	2
	油蒿	—	2.78	—	1.01	1.79	2

## 2.2 灌丛微生境地表植被分布

由表 4 可知,榆阳研究区微生境间相似性系数分别为 0.50,0.45,0.50,说明在榆阳研究区柠条与油蒿、柠条与裸地、油蒿与裸地微生境间物种相似性均表现为中等相似;盐池研究区柠条与油蒿、柠条与裸地、油蒿与裸地微生境间相似性系数分别为 0.20,0.31,0.62,说明在盐池研究区柠条与油蒿、裸地间物种相似性分别为极不相似和中等不相似,而油蒿与裸地间物种相似性为中等相似;沙坡头研究区柠条与油蒿、柠条与裸地、油蒿与裸地微生境间物种相似性系数分别为 0.00,1.00,0.00,说明在沙坡头研究区油蒿与柠条、裸地间物种相似性为极不相似,而柠条与裸地相似性为极相似。

表 4 灌丛微生境地表草本物种的 Jaccard 系数

研究区	柠条 & 油蒿	柠条 & 裸地	油蒿 & 裸地
榆阳	0.50	0.45	0.50
盐池	0.20	0.31	0.62
沙坡头	0.00	1.00	0.00

整体来看,榆阳和盐池研究区 3 种微生境有草本植被分布,而沙坡头研究区仅柠条和裸地微生境中有草本植被分布。由表 5 可知,草本植物物种数既受到微生境的显著影响,亦受到研究区的显著影响。草本植物个体数受到微生境的显著影响,而受到研究区的影响较小。草本植物高度受到研究区的显著影响较大,而受到微生境的影响较小。

由图 5 可知,榆阳研究区植物物种数表现为油蒿显著低于柠条和裸地 ( $p < 0.05$ );盐池研究区植物物种数表现为柠条、油蒿无显著差异,但均显著低于裸

地;沙坡头研究区植物物种数表现为柠条、裸地间无显著差异。并且,柠条微生境中植物物种数表现为沙坡头显著低于榆阳、盐池 ( $p < 0.05$ );而油蒿、裸地微生境表现为盐池  $>$  榆阳  $>$  沙坡头 ( $p < 0.05$ )。

表 5 研究区和微生境对地表草本物种数、个体数和高度的双因素方差分析

因子	物种数(F)	个体数(F)	高度(F)
研究区	34.49*	1.06	45.87*
微生境	6.19*	4.28*	3.16
研究区 $\times$ 微生境	1.82	1.07	1.92

由图 5 可知,榆阳研究区植物个体数表现为柠条显著高于油蒿、裸地 ( $p < 0.05$ );盐池研究区植物个体数在 3 种微生境间无显著差异;沙坡头研究区柠条与裸地间无显著差异。并且,柠条微生境植物个体数表现为 3 个研究区间无显著差异;油蒿微生境则表现为:盐池  $>$  榆阳  $>$  沙坡头 ( $p < 0.05$ );裸地微生境植物个体数表现为榆阳显著低于盐池、沙坡头 ( $p < 0.05$ )。

由图 5 可知,榆阳研究区植物高度在 3 种微生境间无显著差异;盐池研究区植物高度表现为柠条显著高于油蒿和裸地 ( $p < 0.05$ );沙坡头研究区植物高度表现为柠条和裸地无显著差异。并且,3 种微生境间植物高度均表现为沙坡头研究区显著低于榆阳、盐池研究区 ( $p < 0.05$ )。

## 2.3 植物群落与土壤性质间的关系

由表 6 可知,榆阳研究区植物物种数与土壤粗沙粒含量 ( $p < 0.05$ ) 呈正相关关系,而与土壤 pH 值 ( $p < 0.05$ )、电导率 ( $p < 0.01$ ) 呈负相关关系。植物个体数与土壤粗沙粒含量呈正相关关系 ( $p < 0.05$ ),而与土壤

容重( $p < 0.05$ ), pH 值( $p < 0.01$ ), 电导率( $p < 0.05$ )呈负相关关系。植物高度与土壤细沙粒含量( $p < 0.01$ ),

土壤含水量( $p < 0.05$ )呈正相关关系, 而与土壤黏粉粒、全碳、全氮含量呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。

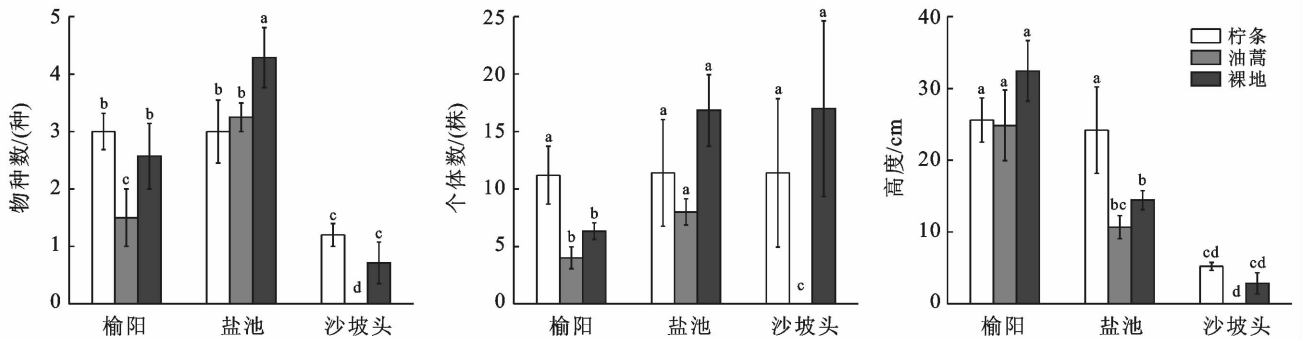


图 5 不同研究区灌丛微生境地表草本植物物种数、个体数及高度分布

盐池研究区植物物种数与土壤细沙粒含量、容重呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 而与土壤黏粉粒含量、电导率、全碳、全氮含量呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。植物个体数与土壤细沙粒含量、容重呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 而与土壤黏粉粒含量、电导率、全碳、全氮含量呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。植物高度与土壤全碳呈正相关关系( $p < 0.05$ ), 而与土壤含水量( $p < 0.05$ )呈负相关关系。

沙坡头研究区植物物种数与土壤细沙粒含量、容重呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 而与土壤 pH 值呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。植物个体数与细沙粒含量、容重呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 而与土壤 pH 值、全氮呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。植物高度与土壤容重( $p < 0.01$ )、细沙粒含量( $p < 0.05$ )呈正相关关系, 而与土壤 pH 值、全氮含量呈负相关关系( $p < 0.05$ )。

表 6 不同研究区植物群落数量特征、土壤性质间的相关系数

土壤因素	榆阳			盐池			沙坡头		
	物种数	个体数	高度	物种数	个体数	高度	物种数	个体数	高度
黏粉粒	-0.26	-0.13	-0.29**	-0.21**	-0.35**	0.28	—	—	—
细沙粒	-0.01	-0.01	0.31**	0.15**	0.41**	-0.18	0.32**	0.47**	0.31*
粗沙粒	0.33*	0.18*	-0.02	0.10	0.22	0.20	—	—	—
含水量	-0.15	-0.31	0.25*	0.26	-0.26	-0.59*	0.17	0.07	0.33
容重	-0.22	-0.32*	0.18	0.47**	0.51**	0	0.58**	0.60**	0.45**
pH 值	-0.29*	-0.58**	-0.08	-0.05	0.04	-0.30	-0.55**	-0.60**	-0.33*
电导率	-0.44**	-0.52*	0.07	-0.26**	-0.35**	0.29*	-0.05	-0.21	-0.15
全碳	-0.39	-0.08	-0.60**	-0.30**	-0.45**	0.25	-0.08	-0.26	-0.04
全氮	-0.33	-0.12	-0.46**	-0.27**	-0.40**	0.30	-0.30*	-0.22**	-0.33*

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.05, 0.01 水平(双侧)上显著相关。

### 3 讨论

人工栽植固沙灌丛的生长过程中对土壤理化性质产生了一定的影响, 但不同土壤性质间存在较大差异<sup>[19]</sup>。土壤粒径分布影响土壤肥力状况和土壤侵蚀等, 是土壤重要的物理性质之一<sup>[20]</sup>。本研究中, 3 种微生境在 3 个研究区间土壤粒径组成分布存在显著差异。榆阳和盐池研究区微生境中土壤粒径分布包括土壤黏粉粒、细沙粒、粗沙粒, 这与杨帆等<sup>[21]</sup>研究结果相似。但在沙坡头研究区没有土壤黏粉粒和粗沙粒, 只有细沙粒, 这与李超等<sup>[22]</sup>的研究结果相似, 在腾

格里沙漠研究发现, 沙丘沙粒的总体结构是细沙粒, 黏粉粒含量很少, 不含粗沙粒。并且, 在榆阳研究区油蒿显著增加了土壤黏粉粒含量, 而柠条中土壤粗沙粒含量较高。该研究区油蒿较柠条低矮<sup>[23]</sup>, 近地层分支多, 表层极细物质容易积累, 使得土壤黏粉粒含量较高。在盐池研究区油蒿降低土壤黏粉粒含量, 这是由于油蒿灌丛根系浅且不发达, 土壤易粗粒化, 导致土壤黏粉粒含量减少<sup>[23-24]</sup>。在沙坡头研究区只含有土壤细沙粒, 因此灌丛微生境间土壤粒径无显著差异。从灌丛微生境来看, 柠条和裸地对土壤黏粉粒表现为榆阳研究区低于盐池研究区, 而油蒿土壤黏粉粒

则表现为两个研究区间无显著差异性。说明油蒿灌丛低矮,浅层土壤根系较多,这对降雨的侵蚀作用会起到一定缓冲作用,使得油蒿下土壤黏粉粒在研究区间差异缩小。

本研究中,灌丛微生境对土壤含水量的影响并不显著,这刘任涛等<sup>[25]</sup>、李新荣等<sup>[4]</sup>的研究结果不同。原因是本研究样地属于封育多年的灌丛林地,从而导致土壤含水量相对均匀性分布的缘故。但不同微生境下土壤含水量在 3 个研究地区间存在显著差异,均表现为盐池最高,榆阳次之,沙坡头最低,这与 3 个研究地区的降水量和潜在蒸散量(表 1)密切相关。榆阳研究区柠条显著降低了土壤容重。这主要是柠条近地表分支较油蒿少<sup>[26]</sup>,受风吹影响较大,从而使柠条灌丛下土壤相对疏松,使得土壤容重降低。盐池、沙坡头研究区不同微生境间无显著差异,说明在盐池、沙坡头研究区灌丛的栽植对土壤容重的影响很小,这与盐池、沙坡头研究区土壤容重本身变异效果较小有关<sup>[27]</sup>。微生境下土壤容重在 3 个研究区间存在一定差异,柠条和裸地土壤容重表现为沙坡头研究区高于榆阳、盐池研究区,这与 3 个研究区的土壤粒径有一定的关系。有研究表明,土壤黏粉粒含量越高,则土壤容重越小;土壤沙粒含量越高,土壤容重越高<sup>[27]</sup>。

这是因为柠条为深根系灌木,植物冠幅大,树皮光滑,其较容易产生树干径流,较多的树干径流流向土壤,同时大气沉降物含有一些酸性物质附着于冠层,降雨后受雨水洗脱而进入土壤<sup>[28]</sup>。3 种微生境在 3 个研究区对土壤 pH 值的影响均表现为榆阳显著低于盐池、沙坡头。榆阳研究区土壤为灰褐土<sup>[12]</sup>,土壤中偏酸性<sup>[28]</sup>;盐池、沙坡头研究区分别为灰钙土、灰漠土<sup>[13,14]</sup>,土壤均中偏碱性<sup>[28]</sup>。本研究结果中,土壤电导率受灌丛微生境的影响较小。仅沙坡头研究区柠条显著降低了土壤电导率,这与柠条灌丛可降低土壤中含盐量,进而导致土壤电导率较低密切相关。不同灌丛微生境土壤电导率在 3 个研究区均表现为榆阳研究区小于盐池、沙坡头研究区。原因在于榆阳研究区降雨量比盐池、沙坡头研究区高(表 1),土壤盐分随水分下渗,表层土壤盐含量降低,进而导致电导率降低<sup>[12-14,29]</sup>,同时盐池、沙坡头研究区的地带性土壤类型分别为灰钙土、灰漠土(表 1),这些土壤易盐化、碱化,使得土壤电导率要高于榆阳。

在榆阳研究区均表现为油蒿显著提高土壤全碳、全氮含量,而盐池研究区表现为柠条显著提高土壤全碳、全氮含量。常海涛等<sup>[29]</sup>研究得出土壤全碳、全氮含量与土壤黏粉粒含量呈显著正相关关系,黏粉粒越高,土壤全碳、全氮越高。沙坡头研究区土壤全碳、全

氮在不同微生境间无差异,主要是沙坡头研究区只含有土壤细沙,且 3 种微生境间土壤细沙粒无显著差异,而土壤细沙粒与土壤全碳、全氮呈显著负相关关系<sup>[30]</sup>,从而导致土壤全碳、全氮含量无显著差异。灌丛微生境下土壤全碳、全氮在 3 个研究区均表现为沙坡头研究区最低<sup>[31]</sup>。研究表明土壤全碳、全氮含量随降水梯度递减呈递减趋势,而沙坡头研究区较榆阳、盐池研究区降水量为最低(表 1)。说明随降雨量减少,灌丛对土壤养分改善作用逐渐降低。

在灌丛土壤表层(0—20 cm),灌丛下土壤属性受到植被和大气沉降以及降雨的淋溶作用的影响,柠条和油蒿土壤粒径和养分均有向灌丛下聚集的表现 $[E(RR) > 1]$ ,该研究中不同降水下柠条、油蒿对土壤属性的富集效果不同。总体上榆阳、沙坡头研究区油蒿灌丛的土壤属性富集高于柠条灌丛,相对柠条灌丛(高度:126.67±1.41 cm),油蒿灌丛的高度低、矮(高度:71.33±1.81 cm),灌丛的遮蔽和凋落物的捕获积累作用更为明显<sup>[3]</sup>。盐池研究区柠条灌丛的土壤属性富集高于油蒿灌丛,这与之前研究结果有所差异。油蒿灌丛侧根将周围土壤中的养分吸收后,一部分供植物生长发育的需要,一部分通过凋落物的形式聚集到冠层下形成养分库,同时油蒿灌丛的主根分布在土壤表层<sup>[32]</sup>,这可能导致油蒿对土壤属性的富集较柠条灌丛少的重要原因。柠条灌丛下对土壤黏粉粒、细沙粒、粗沙粒、全碳富集在盐池研究区富集相对较高,这是因为在盐池研究区柠条灌丛对土壤具有正向促进作用;油蒿下沙坡头研究区对土壤细沙粒、全碳、全氮富集相对较高,这是因为干旱半干旱灌丛“肥岛”效应的发育程度随干旱程度的增加而增加<sup>[33]</sup>,而沙坡头研究区降水最少,灌丛“肥岛”效应较强。

除了对土壤性质产生较大影响外,灌丛对草本植物分布特征亦产生较大影响。通过灌丛微生境地表草本物种的 Jaccard 系数表明,柠条、油蒿、裸地间植物组成在榆阳相似度表现为中等不相似。说明榆阳研究区柠条、油蒿灌丛与裸地相比物种更替率均低。在盐池 3 种微生境间植物组成表现为不相似,而油蒿与裸地间植物组成表现为中等相似,说明和榆阳研究区相比,盐池研究区柠条与油蒿、裸地间植物物种更替率较高。在沙坡头研究区油蒿灌丛与柠条、裸地间植物组成表现为极不相似,而柠条与裸地间表现为极相似,说明油蒿与柠条、裸地相比物种更替率较高。不同降水研究区灌丛微生境间表现的物种相似性不同,这是因为随着降水梯度变化,灌丛微生境对降雨截留量不同,进而对植被的影响也不同。有研究表明,降雨量过大时,灌丛截流量少,而降雨量少时,灌



丛截留量多<sup>[33]</sup>。本研究榆阳研究区降雨量高,可能导致不同灌丛结构对降雨截留量的影响较少,导致在榆阳研究区灌丛微生境间土壤水分差异较小而导致草本植物物种组成分布差异较小;但盐池、沙坡头研究区降水量少,不同灌丛截留量对降雨的影响较大,因此在盐池、沙坡头研究区灌丛微生境间物种存在较大差异。

地表草本植物物种数既受到研究区的影响又受到灌丛微生境的影响,在榆阳研究区植物物种数油蒿显著低于裸地和柠条。因为榆阳研究区油蒿灌丛下土壤 pH 比裸地和柠条高(见图 2),而在榆阳研究区土壤 pH 与地表草本物种数呈负相关关系(表 7),这与前人的研究结果相一致<sup>[34-35]</sup>。盐池研究区柠条、油蒿生境中植物物种数均显著低于裸地,因为盐池降水量较少(表 1),灌丛对降水有一定截留,从而与地表草本形成一定竞争关系降低草本植物物种分布<sup>[36]</sup>。沙坡头研究区油蒿下植物物种数显著低于柠条和裸地,这与沙坡头研究区降水量低密切相关(表 1)。在沙坡头研究区,灌丛对降水截留性严重,灌丛与植被间竞争比较激烈,加之油蒿在秋季比柠条含有较高排他性物质,如单酚、单宁物质<sup>[34]</sup>,促使油蒿下植物物种数极少甚至没有。同一灌丛微生境下不同研究区均表现为沙坡头研究区物种数最少,这与研究区间降水量分布差异密切相关。

地表草本植物个体数仅受到灌丛微生境影响。在榆阳柠条灌丛下草本植物个体数显著多于油蒿、裸地。这与榆阳研究区土壤 pH 值有一定关系。相关分析表明,植物个体数与土壤 pH 值呈显著负相关关系,这与裴世芳等<sup>[35]</sup>研究结果相同。说明土壤 pH 值越低,植物个体数越多。本研究中土壤 pH 值在榆阳均表现为柠条显著低于油蒿、裸地。在盐池、沙坡头研究区植物个体数在不同微生境间无显著差异,这与土壤容重密切相关<sup>[36]</sup>。本研究结果中土壤容重在盐池、沙坡头在灌丛微生境间无显著差异。地表草本植物高度表征了植物个体的生长状况<sup>[37]</sup>。在榆阳研究区 3 个微生境间草本植物高度无显著差异,原因是干旱区土壤水分条件对植物生长发育具有重要作用<sup>[38]</sup>,3 个灌丛间土壤含水量分布相似决定了植物生长高度呈现出相似性。在盐池研究区草本植物高度表现为柠条显著高于油蒿、裸地,这与灌丛微生境间土壤全碳含量分布密切相关<sup>[35]</sup>。本试验中盐池土壤全碳含量表现为柠条灌丛显著高于油蒿灌丛、裸地。从表 6 中可知,植物高度在同一灌丛微生境下不同研究区均表现为沙坡头最低。沙坡头降水量为最低(表 1),说明供植物生长所需提供的水分最低,从而导致草本植物高度较低。

## 4 结论

(1) 榆阳研究区柠条灌丛可降低土壤容重,油蒿灌丛下土壤黏粉粒增加,土壤养分增加,说明这两种灌丛对土壤均有一定的正向作用,同时柠条灌丛可提高植物物种数和个体数,因此柠条、油蒿栽植可作为该研究区重要的固沙灌丛选择。

(2) 盐池研究区柠条灌丛下土壤容重较低,有机质含量较高,说明柠条灌丛对盐池研究区土壤修复具有正向作用,同时柠条灌丛下草本植物高度增高,因此柠条可作为该研究区的最佳固沙灌丛。

(3) 沙坡头研究区柠条、油蒿灌丛均对土壤理化性质也有一定的影响,但油蒿下无草本植被分布,因此柠条可作为该研究区的最佳固沙灌丛选择。

(4) 综合表明,随降水量增加,灌丛微生境土壤细沙粒含量、土壤容重和土壤电导率降低,而土壤养分相对增加,草本植物物种数、个体数、高度均相对增加。说明降水量对灌丛的生态功能具有重要调控作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱广菁. 重温联合国千年生态系统评估报告:中国科协第十八期新观点新学说学术沙龙探讨土地生态学与生态文明的机遇与挑战[C]//新观点新学说学术沙龙文集(18):土地生态学:生态文明的机遇与挑战,2008.
- [2] 刘任涛. 沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系[J]. 生态学杂志,2014,33(12):3463-3469.
- [3] 刘学东,陈林,杨新国,等. 荒漠草原 2 种柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛土壤养分“肥岛”效应[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):26-32.
- [4] 李新荣,张志山,王新平,等. 干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠,2009,29(5):845-852.
- [5] 吴旭东,宋乃平,潘军. 不同沙地生境下柠条灌丛化对草地土壤有机碳含量及分布的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(10):115-121.
- [6] 牛西午,张强,杨治平,等. 柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究[J]. 西北植物学报,2003,23(4):628-632.
- [7] 杨刚,王思成,杨智明. 不同放牧强度对荒漠草原植被和滩羊生产性能影响研究[J]. 中国饲料,2009(22):12-15.
- [8] 田丽. 毛乌素沙地东南缘植被恢复中优势灌丛的保育作用研究[D]. 陕西 西安:陕西师范大学,2016.
- [9] Liu Jiliang, Zhao Wenzhi, Li Fenrui. Effects of shrub presence and shrub species on ground beetle assemblages (Carabidae, Curculionidae and Tenebrionidae) in a sandy desert, northwestern China [J]. Journal of Arid Land,

- 2015,7(1):110-121.
- [10] Noemi Mazia C, Chaneton E J, Kitzberger T. Small-scale habitat use and assemblage structure of ground-dwelling beetles in a patagonian shrub steppe[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006,67(2):177-194.
- [11] 张安宁,刘任涛,杜灵通. 气候梯度下潜在蒸散分布差异及影响因素[J]. *西北林学院学报*, 2020,35(5):23-28,96.
- [12] 刘晓英,廉振民,李晓涛. 毛乌素沙漠南缘沙区恢复生态系统蝗总科昆虫多样性研究[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2003,22(1):71-76.
- [13] 杨越. 盐池县植被恢复过程的景观动态与生态效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [14] 李新荣,周海燕,王新平,等. 中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站 60 年重要研究进展综述[J]. *中国沙漠*, 2016,36(2):247-264.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [16] Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhao Wenzhi, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. *Geoderma*, 2003,122(1):43-49.
- [17] 于明坚,丁炳扬,俞建,等. 水盾草入侵群落及其生境特征研究[J]. *植物生态学报*, 2004,28(2):231-239.
- [18] 陈星. 白马雪山国家级自然保护区小型兽类及其寄生蚤群落生态学研究[D]. 云南 大理:大理大学,2019.
- [19] 李新荣,张志山,黄磊,等. 我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013,58(5/6):397-410.
- [20] 罗雅曦,刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2019,26(5):60-67.
- [21] 杨帆,靳鹤龄,李孝泽,等. 中晚全新世毛乌素沙地东南部气候变化过程[J]. *中国沙漠*, 2017,37(3):431-438.
- [22] 李超,董治宝,崔徐甲. 腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2015,35(1):129-135.
- [23] 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等. 贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征[J]. *生态学报*, 2013,33(21):7013-7022.
- [24] 高国雄. 毛乌素沙地东南缘人工植被结构与生态功能研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [25] 刘任涛,杨新国,宋乃平,等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J]. *水土保持学报*, 2012,26(4):108-112.
- [26] 张亚峰,王新平,虎瑞,等. 荒漠灌丛降雨再分配对土壤 pH 值的影响[J]. *中国沙漠*, 2013,33(5):1400-1405.
- [27] Matschonat G, Falkengren-Grerup U. Recovery of soil pH, cation-exchange capacity and the saturation of exchange sites from stemflow-induced soil acidification in three Swedish beech (*Fagus sylvatica* L.) forests [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000,15(1):39-48.
- [28] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京:中国林业出版社,2005:360.
- [29] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等. 草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征:以腾格里沙漠东南缘为例[J]. *水土保持学报*, 2018,32(6):58-65.
- [30] 宋一凡,卢亚静,刘铁军,等. 荒漠草原不同雨量带土壤—植物—微生物 C、N、P 及其化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020,40(12):4011-4023.
- [31] 苏永中,赵哈林,张铜会,等. 几种灌丛、半灌丛对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. *应用生态学报*, 2002,13(7):802-806.
- [32] 曹艳峰,丁俊祥,于亚军,等. 不同质地土壤中荒漠灌木梭梭“肥岛”的初步探讨[J]. *土壤学报*, 2016,53(1):261-270.
- [33] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J]. *生态环境学报*, 2009,18(2):643-647.
- [34] 李九月. 荒漠地区主要灌木类植物酚类物质含量动态规律及生物学评价[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [35] 裴世芳. 放牧和围封对阿拉善荒漠草地土壤和植被的影响[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2007.
- [36] 温培才,王霖娇,盛茂银. 西南喀斯特高原峡谷石漠化生态系统植物群落特征及其与土壤理化性质的关[J]. *四川农业大学学报*, 2018,36(2):175-184.
- [37] 吕晓敏,王玉辉,周广胜,等. 温度与降水协同作用对短花针茅生物量及其分配的影响[J]. *生态学报*, 2015,35(3):752-760.
- [38] 盘远方,李娇凤,黄昶吟,等. 桂林岩溶石山不同坡向灌丛植物多样性与土壤环境因子的关系[J]. *广西植物*, 2019,39(8):1115-1125.