

DOI: 10.20103/j.stxb.202210223010

解李娜, 吴祺琪, 王宇萌, 张明伟, 何鹏, 马成仓. 锦鸡儿属灌木阻止干旱草地沙漠化生态过程. 生态学报, 2024, 44(4): 1680-1691.

Xie L N, Wu Q Q, Wang Y M, Zhang M W, He P, Ma C C. Ecological processes of preventing arid grasslands from changing into deserts by *Caragana* shrubs. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1680-1691.

锦鸡儿属灌木阻止干旱草地沙漠化生态过程

解李娜, 吴祺琪, 王宇萌, 张明伟, 何 鹏, 马成仓*

天津师范大学生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387

摘要: 纵观全球沙漠化的研究进展, 从宏观上研究沙漠化现状和后果的报道较多, 对沙漠化内在过程的综合研究较少, 灌木在阻止干旱区草原沙漠化中的生态作用缺乏研究。研究假设: 在干旱地区, 灌木的存在提高土壤营养水平, 提升土壤保水能力, 促进林下植物和土壤生物群落, 进而减轻风蚀和固结土壤, 这些相互联系的生态过程共同阻止了草原沙漠化。为了验证上述假设, 我们以内蒙古阿拉善地区的荒漠化草原为样地, 研究锦鸡儿属灌木的固土能力、提高土壤保水能力、改善土壤营养能力和促进生物群落能力, 从生物、土壤、水分和沙物质运动等多过程来探讨锦鸡儿属灌木在阻止草原沙漠化中的作用。目的是弄清灌木阻止干旱草地沙漠化的生态过程。在阿拉善荒漠化草原区, 锦鸡儿属灌木盖度大约为 12.40%。在 100 m² 的土地上现有灌木固土 2.01 m³, 固土效率为 167 cm³/g 鲜重, 每年灌木生长可以增加固土能力 0.264 m³/100 m² 土地。锦鸡儿属灌木提高了土壤湿度(灌丛效应 SE=0.120)和土壤对雨水的保持能力(SE 0.155), 改善了土壤营养(有机质 SE 0.234、有效氮 SE 0.338、有效磷 SE 0.256 和有效钾 SE 0.089), 增加了植物群落的物种丰度、多度、植株高度和生物量(SE 0.298)以及土壤生物(微生物和线虫)群落的物种丰度和多度(SE 0.302), 提高了土壤酶活性(碱性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶, SE 0.191—0.365)。综合分析表明锦鸡儿属灌木通过保水(路径系数 PC=0.43)、增肥(PC 0.39)、促进植物(PC 0.34)和土壤微生物群落(PC 0.20), 以及它们共同导致的固土效应等多个相互联系的生态过程阻止干旱草原转变为沙漠。在防止沙漠化的不同过程中, 5 个锦鸡儿属灌木种各有优劣, 这可能是这些种共存于荒漠区的原因之一。灌木作为极端干旱荒漠区的主要植被, 在阻止干旱地区草地沙漠化中发挥着重要作用。

关键词: 灌木; 荒漠化草原; 沙漠化; 固沙; 土壤水分; 土壤营养; 生物群落

Ecological processes of preventing arid grasslands from changing into deserts by *Caragana* shrubs

XIE Lina, WU Qiqi, WANG Yumeng, ZHANG Mingwei, HE Peng, MA Chengchang*

Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Looking at the research on desertification worldwide, numerous studies have examined the current status and consequences of desertification from a macro perspective. However, little is known regarding the inherent processes of desertification, as well as the ecological role of shrubs in preventing grasslands desertification in arid regions. We hypothesized that in arid areas, the presence of shrubs increased soil nutrient levels and soil water retention capacity, facilitated understory plants and soil biotas, which in turn reduced wind erosion and increased soil consolidation. These interconnected ecological processes jointly prevented the movement of sand material and arid grasslands from changing into deserts. In order to test the hypothesis, we took the desertification grassland in the Alashan area of the Inner Mongolia as a sample site to study sand fixation ability, improving soil water retention capacity, ameliorating soil nutrition and facilitating biota community of *Caragana* shrubs, and explore the role of *Caragana* shrubs in preventing grasslands desertification in

基金项目: 天津市自然科学基金(22JCQNJC00170); 国家自然科学基金项目(31901140, 32001147)

收稿日期: 2022-10-22; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: machengchang@163.com

arid regions from the perspective of organism, soil, water, and sand material movement. Our aim was to understand the ecological processes by shrubs preventing arid grasslands from changing into deserts. In the desertification grassland of Alashan region, the cover of *Caragana* shrubs was about 12.40%. On the 100 m² land, the soil-fixation by existing shrubs was 2.01 m³, soil-fixation efficiency was 167 cm³/g shrubs fresh weight, and the annual growth of the *Caragana* shrubs on 100 m² land could increase the soil-fixation capacity by 0.264 m³. *Caragana* shrubs increased both soil water content (shrub effect SE=0.120) and rainwater retention (SE 0.155), improved soil nutrition (soil organic matter SE 0.234, available nitrogen SE 0.338, available phosphorus SE 0.256, and available potassium SE 0.089), facilitated plant communities (species richness, abundance, height, and biomass; SE 0.298) and soil biota communities (richness and abundance of soil microorganisms and soil nematodes; SE 0.302), increased soil enzyme activities (alkaline phosphatase, sucrase, urease, and catalase; SE 0.191—0.365). In conclusion, our research suggested that *Caragana* shrubs prevented grasslands from changing into deserts through multiple interrelated ecological processes, such as increasing water retention (path coefficient PC 0.43), accelerating fertilization (PC 0.39), facilitating plant (PC 0.34) and soil microbial community (PC 0.20), and their combined effects on soil fixation. Each of the five *Caragana* species had its own advantages and disadvantages in different aspects of preventing desertification. This would be one of the reasons why these species can coexist in desert areas. *Caragana* shrubs, as the main vegetation in extreme arid regions, play an important role in preventing grasslands desertification in Alashan arid region.

Key Words: shrub; desertification steppe; sandy desertification; soil fixation; soil water; soil nutrients; biota communities

沙漠化被认为是世界范围内重要的生态环境问题之一,并日益受到人们的重视。目前全球超过 40% 的土地已经形成沙漠或直接受到沙化的威胁^[1-2]。中国的荒漠化土地主要集中在西北、华北北部、东北西部及西藏西北部等干旱、半干旱地区,占国土总面积 27.33%,其中沙漠化土地面积占国土总面积 18.03%,而且呈逐年增加的趋势^[2-3]。因此,土地沙漠化成因及防治等一直是生态学研究的热点。土地沙漠化是一个非常复杂的过程,经历了植被退化,土壤退化、沙化、保水能力降低,沙物质移动形成移动沙丘(沙丘活化)等生物和物理过程。然而,纵观全球沙漠化研究进展,大多集中在从宏观上研究沙漠化现状和后果,对沙漠化内在过程的综合研究很少^[3]。

气候和人为干扰导致的植被退化是土地沙化的起因,因此植被构建是阻止沙漠化的最有效方法。在干旱、半干旱地区,降雨量少,蒸发大,土壤结构疏松、营养匮乏,导致草本植物难以独立存活,一些强旱生灌木则成为主要植物种。目前大部分研究关注这些灌木如何适应严酷的沙质环境^[4-8],关于其在阻止干旱区土地沙漠化中的生态作用尚缺乏研究。

阿拉善是中国北部典型的荒漠化地区之一。在阿拉善荒漠草原区,植被盖度低(小于 20%),锦鸡儿属(*Caragana*)灌木占植被总生物量的 40%—60%。该属物种为豆科落叶灌木,同时兼备有性繁殖和克隆繁殖,具有较强的适应干旱沙质环境的能力^[4,7-12],是防风固沙、保持水土的优良灌木^[13-16]。

我们假设:在干旱地区,灌木的存在提高土壤营养水平,提升土壤保水能力,促进林下植物和土壤生物群落,进而减轻风蚀、固结土壤,这些相互联系的生态过程共同阻止了草原沙漠化。为了验证上述假设,我们以内蒙古阿拉善地区的荒漠化草原为样地,研究锦鸡儿属灌木的固土能力、提高土壤保水能力、改善土壤营养能力和促进生物群落能力,从生物、土壤、水分和沙物质运动等多过程来探讨锦鸡儿属灌木在阻止草原沙漠化中的作用。目的是弄清灌木阻止干旱草地沙漠化的生态过程。

1 材料和方法

1.1 研究地点

阿拉善荒漠区地处内蒙古高原西部,位于东经 97°10′—106°52′,北纬 37°24′—42°47′之间,其东西向长约

800 km,南北向宽约 400 km,总面积约为 27 万 km²。该地区是极度干旱区,巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠横贯全境,占总面积 1/3,另有 1/3 的戈壁、1/3 的荒漠草原^[2]。研究发现,阿拉善荒漠区沙漠不断侵蚀草原,沙漠平均每年增加 353 km²^[21];与此同时,也有一部分荒漠(—50 km²/a)逆转为非荒漠^[17]。

田间试验在阿拉善左旗腾格里沙漠东缘(38.84° N, 105.66° E; 海拔 1550 m)进行。研究区年平均温度 7.8℃,平均年降水量 110 mm,年日照时间 3200 h,年总辐射 1.71 kJ cm⁻² d⁻¹。该地区植被类型属于荒漠化草原,主要植被是强旱生灌木^[18]。建群种是锦鸡儿属(*Caragana*)灌木,主要包括柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、狭叶锦鸡儿(*C. stenophylla*)、荒漠锦鸡儿(*C. roborovskiyi*)、短脚锦鸡儿(*C. brachypoda*)和垫状锦鸡儿(*C. tibetica*)。其它植物种包括灌木白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙木蓼(*Atraphaxis frutescens*)、半日花(*Helianthemum songaricum*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)和草本植物沙生针茅(*Stipa glareosa*)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、地稍瓜(*Cynanchum thesioides*)和黄芪(*Stragalus membranaceus*)。地带性土壤类型为棕灰荒漠土,沙物质含量高,营养含量低。

1.2 锦鸡儿属灌木的盖度、固土能力和植物群落调查

2016 年,在研究区选择 5 个样点,样点间距离大于 30 km。在每个样点设置 25 m×25 m 样方,分别统计每个样方内柠条锦鸡儿、狭叶锦鸡儿、荒漠锦鸡儿、短脚锦鸡儿和垫状锦鸡儿的灌丛数量,然后,每个种随机选取 3—4 个灌丛,测量灌丛面积、灌丛沙堆体积、灌丛鲜重和当年新生枝重量。根据调查数据计算灌丛盖度、灌丛固土能力、固土效率和年增加固土量。这些锦鸡儿属灌木盖度约占植物盖度的 40%。

灌丛盖度(%) = (灌丛平均面积×该种灌丛数量)/样方面积

固土能力(m³/100 m²) = (灌丛沙堆平均体积×该种灌丛数量)/样方面积×100

固沙效率(cm³/g 鲜重) = 灌丛沙堆体积/灌丛鲜重

年增加固土能力(m³/100 m²) = 固沙效率(m³/g 鲜重) × 100 m²土地面积上当年新枝条鲜重(g)

每个锦鸡儿属灌木种随机选择 5 个灌丛(灌丛选择时尽量涉及更多的样地),在灌丛内(灌丛中心位置)和灌丛外(距离灌丛 2 m 以上)分别设置 50 cm × 50 cm 样方。对于每个样方,鉴定样方内所有植物种类(丰度),统计每个种的个体数(多度),测量其高度,收获地上部分测生物量(60℃烘干 72 h)。

1.3 雨水的分布实验

每个锦鸡儿属灌木种随机选择 3 个灌丛,在灌丛内和灌丛外分别设置 50 cm × 50 cm 样方,在一个阴天进行人工降雨实验。人工降雨用喷壶模拟,持续降雨 1 h,降水量 15 mm。人工降雨 24 h 后采集浅层土壤样品(0—20 cm)带回实验室测量土壤含水量。本研究用降雨 24 h 后浅层土含水量表示土壤保持雨水能力。

1.4 土壤含水量和土壤营养测定

每种灌木随机选择 3 个灌丛,采集灌丛内和灌丛外浅层土(0—20 cm)约 300 g,过筛除去石头、植物根和大的凋落物,装入封口袋,置于冰盒,迅速带回实验室,用于测定土壤含水量、土壤营养含量、土壤酶活性,分析土壤微生物群落和土壤线虫群落。

土壤含水量采用烘干法;土壤有机质采用重铬酸钾加热法;硝态氮和铵态氮采用流动分析仪法,用硝态氮和铵态氮之和表示有效氮;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;有效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法。土壤营养测定参考文献鲍士旦^[19]。

1.5 土壤酶活性检测

选择 C、N、P 转化酶(蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶)和抗氧化酶(过氧化氢酶)作为土壤酶代表。蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾容量法。土壤酶活性测定参考文献关松荫^[20]。

1.6 土壤生物群落分析

土壤线虫的分离提取采用改良的 Baermann 法^[21]。取 40 g 鲜土分离土壤线虫,分离时间为 48 h,用 TAF 固定液(三乙醇胺-福尔马林固定液)固定保存线虫。在光学显微镜下鉴定到属,并记录每个属线虫数。鉴定

中,如果样品中的土壤线虫数低于 100 条,则全部鉴定;如果多于 100 条,则随机抽取其中的 100 条鉴定。线虫多度用每 100 g 干土(用土壤含水量换算)中土壤线虫的个体数表示。

采用高通量测序法(美格基因科技有限公司,广州)分析土壤微生物物种丰度。利用土壤 DNA 试剂盒提取土壤样品总 DNA。选择细菌 V3—V4 区的 16S rRNA、真菌 ITS2 区进行 PCR 扩增,细菌的通用引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3');真菌的通用引物为 ITS3-F (5'-GCATCGATGAAGAACGCAGC-3')和 ITS4-R (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')。

采用传统培养法分析土壤微生物的多度。土壤细菌使用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌使用马丁氏培养基,放线菌使用高氏一号培养基。定温培养后,对菌落进行计数。土壤微生物数量用每克干土所含的微生物菌落数表示。

1.7 数据分析

采用灌丛效应(Shrub effect; SE)评价灌木对植物和土壤指标的影响,主要目的是使每个变量组的变量可以加和。灌丛效应计算公式如下:

$$\text{灌丛效应(SE)} = (\text{灌丛内变量值} - \text{灌丛外变量值}) / (\text{灌丛内变量值} + \text{灌丛外变量值})$$

灌丛效应值大于 0 表示灌丛对响应变量具有正效应,小于 0 表示灌丛对响应变量具有负效应。灌丛效应的取值范围在-1 和 1 之间,相当于对数字进行了标准化,允许不同变量之间加和或取平均值。变量组的灌丛效应值是该组内所有变量的平均值。即:土壤湿度灌丛效应是土壤含水量和土壤保持雨水能力灌丛效应的平均值;土壤营养灌丛效应是有机质、有效氮、有效磷和有效钾灌丛效应的平均值;土壤酶灌丛效应是碱性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶灌丛效应的平均值;植物群落灌丛效应是植物丰度、多度、高度和生物量灌丛效应的平均值;细菌群落灌丛效应是细菌多度和丰度灌丛效应的平均值;真菌群落灌丛效应是真菌多度和丰度灌丛效应的平均值;线虫群落灌丛效应是线虫多度和丰度灌丛效应的平均值;微生物群落灌丛效应是细菌群落和真菌群落灌丛效应的平均值;土壤生物群落灌丛效应是线虫群落和微生物群落灌丛效应的平均值。用独立样本 t 检验分析每个灌丛效应值与 0 的差异显著性。用单因素方差分析(ANOVA)检验各指标的种间差异显著性,并用 Tukey HSD 做多重比较。统计分析用 SPSS 20.0 统计软件进行。用结构方程模型分析各变量组的灌丛效应(土壤湿度、土壤营养、土壤酶、土壤微生物、土壤线虫和植物群落)对阻止草地沙漠化(固土能力)的贡献以及变量组之间的相互关系,结构方程模型分析用 AMOS 进行。

2 结果

2.1 锦鸡儿属灌木的盖度

在阿拉善荒漠化草地上,锦鸡儿属灌木的盖度约为 12.40%。虽然不是所有的样地都包含全部 5 种锦鸡儿属灌木,但是 5 个样地均有锦鸡儿属灌木分布。狭叶锦鸡儿和垫状锦鸡儿在 4 个样地出现,柠条锦鸡儿和荒漠锦鸡儿在 3 个样地出现,短脚锦鸡儿在 2 个样地出现。5 种锦鸡儿属灌木盖度表现为柠条锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>垫状锦鸡儿>短脚锦鸡儿,但是种间差异不显著。5 个灌木种的灌丛面积差异很大,柠条锦鸡儿和荒漠锦鸡儿灌丛面积远大于其它 3 个种。柠条锦鸡儿和荒漠锦鸡儿灌丛面积分别为 16.5 m²和 14.9 m²,是属平均面积(7.4 m²)两倍多(图 1)。

2.2 锦鸡儿属灌木的固土能力

在荒漠化草地上,锦鸡儿属灌木在 100 m²的土地上固土(沙)2.01 m³,每增加 1 g 生物量鲜重可以固土 167 cm³。在 100 m²土地上每年依靠锦鸡儿灌木生长可以增加固土能力 0.264 m³(图 2)。5 种灌木都有明显的固土作用,它们对总固土能力的贡献顺序是狭叶锦鸡儿>柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>短脚锦鸡儿>垫状锦鸡儿,但是种间差异不显著。灌木的年增固土量顺序与固土能力相似。5 种灌木的固土效率种间变异很大,柠条锦鸡儿呈现最高固土效率 364.2 cm³/g 鲜重,其次是荒漠锦鸡儿 225.4 cm³/g 鲜重,其它 3 种灌木较低,分别是短脚锦鸡儿 97.6 cm³/g 鲜重、狭叶锦鸡儿 92.7 cm³/g 鲜重、垫状锦鸡儿 57.2 cm³/g 鲜重。

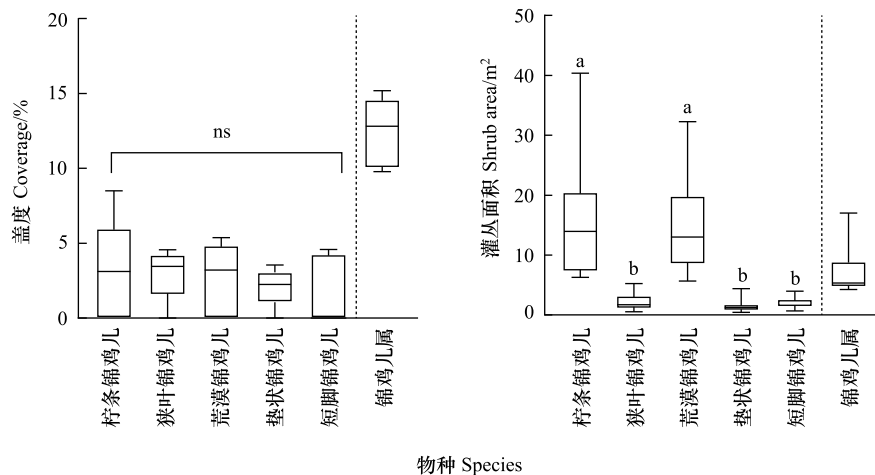


图1 阿拉善荒漠化草地锦鸡儿属灌木的盖度($n=5$)和灌丛面积($n=10$)

Fig.1 Coverage and shrub size of five *Caragana* shrub species in desert steppe of Alashan region

锦鸡儿属盖度为5个种盖度之和,锦鸡儿属灌丛面积为5个种灌丛面积平均值;不同小写字母表示种间差异显著($P<0.05$),ns表示种间无显著差异

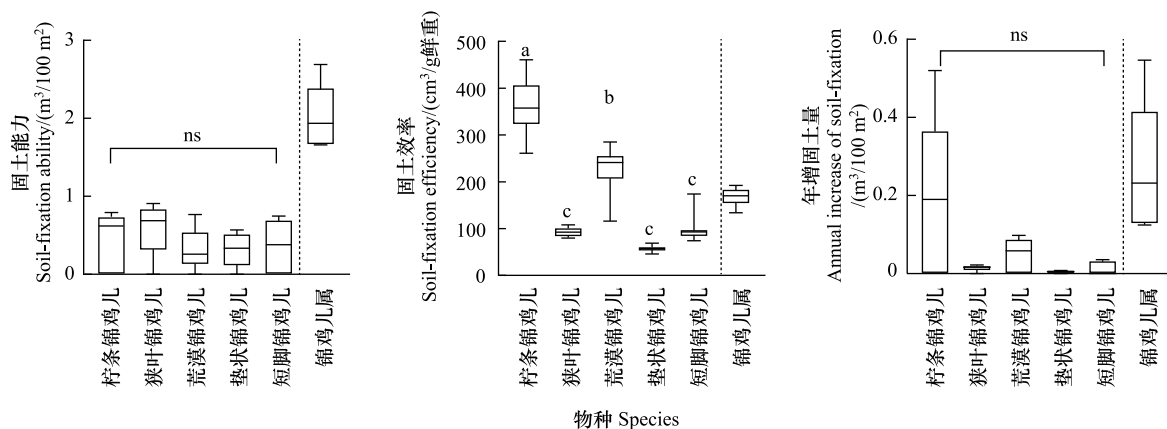


图2 锦鸡儿属灌木的固土能力($n=5$)、固土效率($n=10$)和年增加固土量($n=5$)

Fig.2 The soil-fixation ability, soil-fixation efficiency and annual increment of soil-fixation of *Caragana* shrubs

2.3 锦鸡儿属灌木对土壤水分和土壤保持雨水的效应

锦鸡儿属灌木提高了土壤含水量和土壤保持雨水能力,对土壤保持雨水能力的增强作用(灌丛效应0.155)大于土壤含水量(0.120)(图3)。就5个种而言,柠条锦鸡儿、狭叶锦鸡儿和垫状锦鸡儿显著增加了土壤含水量,它们的灌丛效应依次是0.319、0.152和0.097,其它2个种不显著;灌丛效应顺序是柠条锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>垫状锦鸡儿>短脚锦鸡儿>荒漠锦鸡儿。狭叶锦鸡儿、柠条锦鸡儿和短脚锦鸡儿显著增加了土壤保持雨水能力,它们的灌丛效应依次是0.211、0.194和0.180,其它2个种不显著;灌丛效应顺序是狭叶锦鸡儿>柠条锦鸡儿>短脚锦鸡儿>垫状锦鸡儿>荒漠锦鸡儿。

2.4 锦鸡儿属灌木对土壤营养和土壤代谢的效应

锦鸡儿属灌木改善了土壤营养(灌丛效应0.229),对有效氮的促进作用最大(0.338),其次是土壤有机质(0.234)和有效磷(0.256),对有效钾(0.087)的影响最小(图4)。5种灌木都显著提高了土壤有机质(除了柠条锦鸡儿)、有效氮、有效磷(除了荒漠锦鸡儿)和有效钾(除了荒漠锦鸡儿)。5种灌木对土壤营养的促进作用表现为狭叶锦鸡儿0.304>柠条锦鸡儿0.256>短脚锦鸡儿0.255>垫状锦鸡儿0.223>荒漠锦鸡儿0.108。

锦鸡儿属灌木提高了土壤酶活性(灌丛效应0.279),对碱性磷酸酶的促进作用最大(0.365),其次是蔗糖

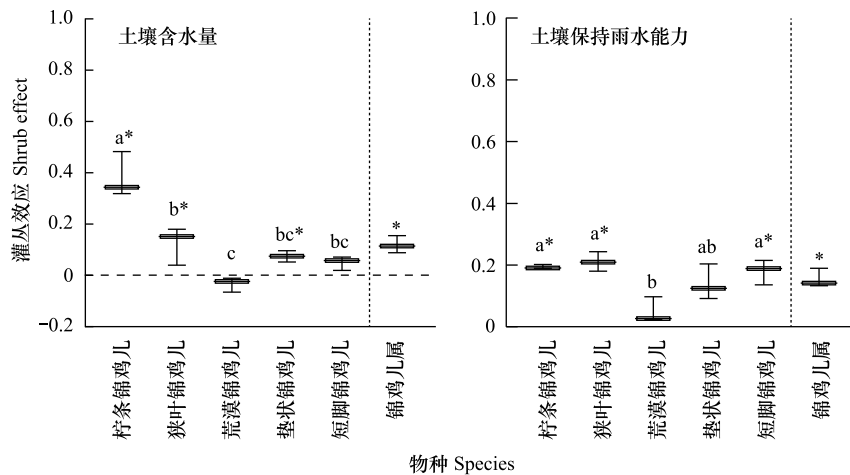


图3 锦鸡儿属灌木对土壤含水量和土壤保持雨水能力的灌丛效应 ($n=3$)

Fig.3 Shrub effect of *Caragana* on soil water content and soil retention rainwater capacity

锦鸡儿属的灌丛效应为5个种的平均值; *表示与0差异显著,不同小写字母表示种间差异显著 ($P<0.05$), ns表示种间无显著差异

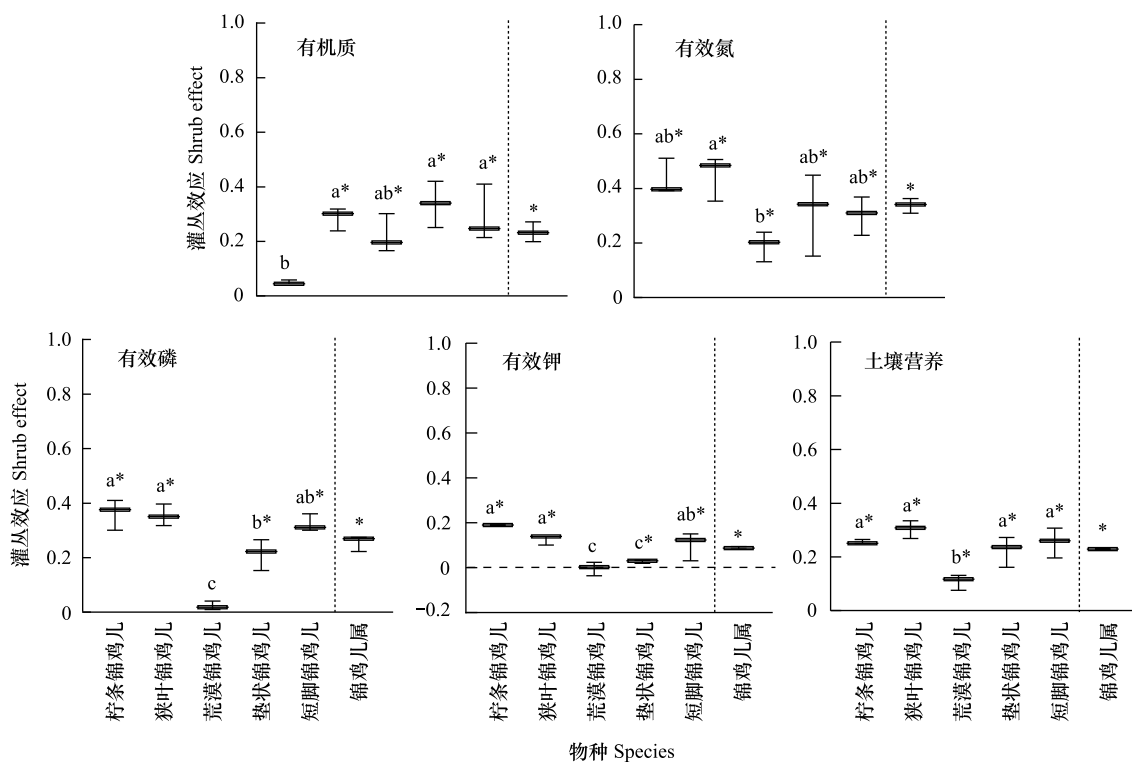
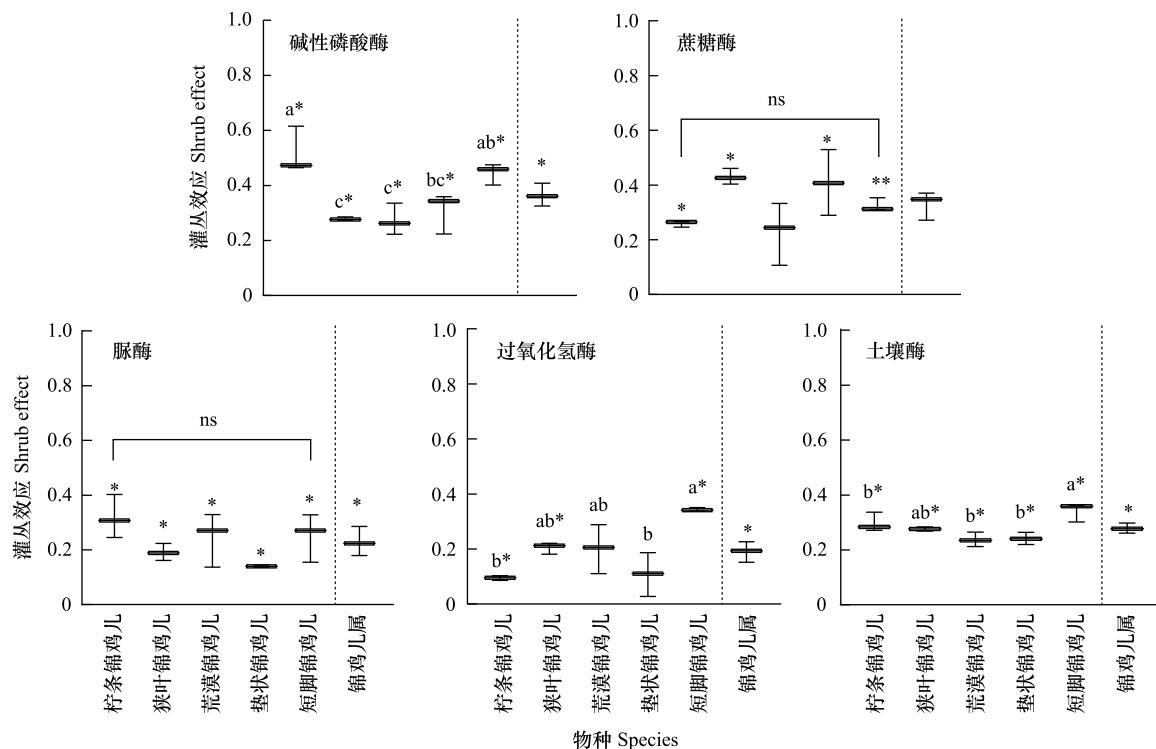


图4 锦鸡儿属灌木对土壤营养的灌丛效应 ($n=3$)

Fig.4 Shrub effect of *Caragana* on soil nutrition

酶(0.330),对过氧化氢酶(0.191)的影响最小(图5)。就5个种而言,它们显著提高了土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶(除了荒漠锦鸡儿)、脲酶和过氧化氢酶(除了荒漠锦鸡儿和垫状锦鸡儿)活性。5种灌木对土壤酶活性的促进作用表现为短脚锦鸡儿 $0.341 >$ 柠条锦鸡儿 $0.283 >$ 狭叶锦鸡儿 $0.269 >$ 荒漠锦鸡儿 $0.235 >$ 垫状锦鸡儿 0.220 。

图5 锦鸡儿属灌木对土壤酶活性的灌丛效应 ($n=3$)Fig.5 Shrub effect of *Caragana* on soil enzyme activities

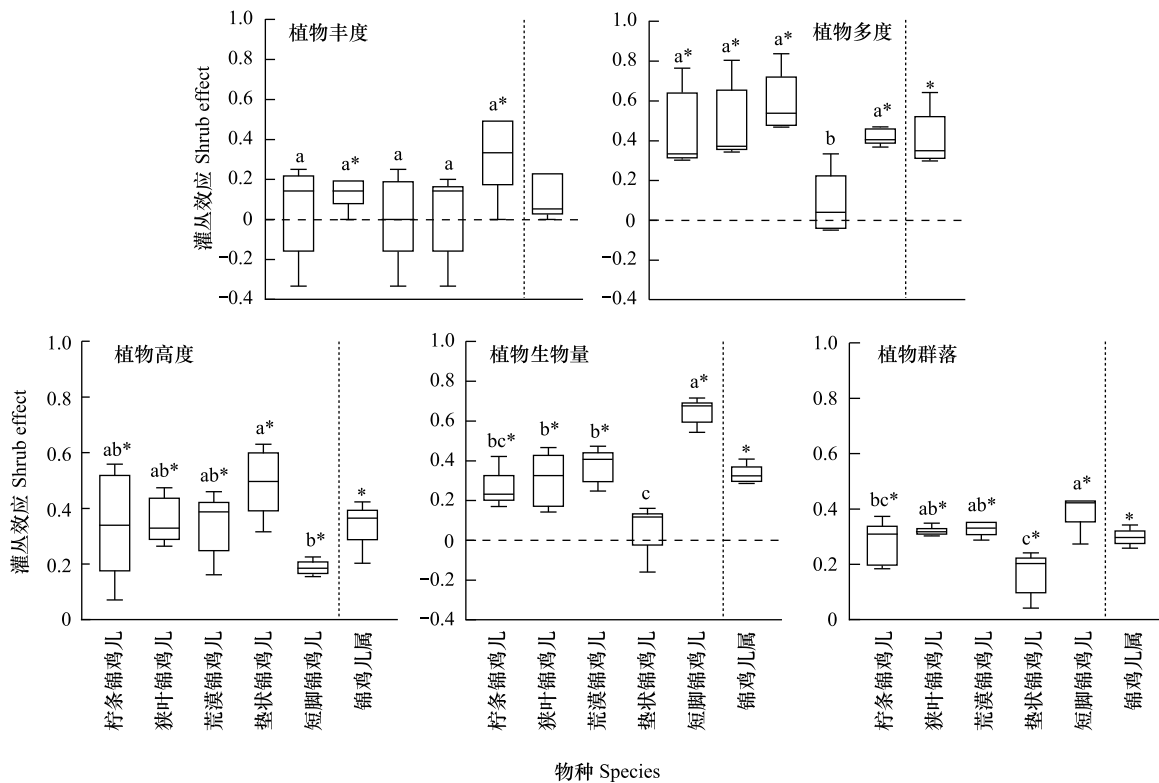
2.5 锦鸡儿属灌木对林下植物群落和土壤生物群落的效应

研究样方中包含了 15 个植物种,其中小画眉草 (*Eragrostis cilianensis*)、刺沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum*)、无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、砂生针茅 (*Stipa glareosa*)、冠芒草 (*Enneapogon boreali*)、松叶猪毛菜 (*Salsola laricifolia*)、黄芪 (*Astragalus scaberrimus*)、匍根骆驼蓬 (*Peganum nigellastrum*)、蒙古虫实 (*Corispermum mongolicum*) 和沙葱 (*Allium mongolicum*) 11 个种在灌丛区域和灌丛外均出现,地梢瓜 (*Cynanchum thesioides*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza daurica*) 和天门冬 (*Asparagus cochinchinensis*) 3 个种仅出现在灌丛区域,而猫刺头 (*Oxytropis aciphylla*) 仅出现在灌丛外。锦鸡儿属灌木对灌丛下植物多度、高度和生物量都有显著促进作用,对植物种丰度促进作用不显著;这说明灌木的促进效应在荒漠草原形成了明显的锦鸡儿灌丛-草本植物群落斑块。灌木对植物多度的促进作用最大(灌丛效应 0.403),其次是植株高度(0.346)和生物量(0.331;图 6)。

狭叶锦鸡儿和短脚锦鸡儿对灌丛下植物种丰度有显著促进作用,其余 3 种灌木无显著促进作用。除了垫状锦鸡儿外,锦鸡儿属灌木对植物多度和生物量均有显著促进作用。5 种锦鸡儿属灌木均显著促进了植株高度。5 种锦鸡儿属灌木均显著促进了灌丛下植物群落,促进作用的顺序是短脚锦鸡儿 0.397>荒漠锦鸡儿 0.330>狭叶锦鸡儿 0.319>柠条锦鸡儿 0.276>垫状锦鸡儿 0.168(图 6)。

锦鸡儿属灌木不仅促进了地上群落的形成,对地下生物群落(包括土壤微生物和土壤线虫群落)也具有明显促进作用。其对土壤微生物群落的促进作用(灌丛效应 0.339)大于线虫群落(0.264),对真菌的促进作用(0.440)大于细菌(0.238;图 7)。锦鸡儿属灌木对地下生物群落的促进效应(0.302)与对植物的效应(0.298)相似(图 6,7)。

锦鸡儿属灌木种均显著促进了土壤细菌的物种丰度和多度、土壤真菌物种丰度和多度(除了柠条锦鸡儿和短脚锦鸡儿对真菌物种丰度影响不显著)、土壤细菌群落、土壤真菌群落和土壤微生物群落(土壤微生物群落的灌丛效应分别是柠条锦鸡儿 0.324,狭叶锦鸡儿 0.374,荒漠锦鸡儿 0.315,垫状锦鸡儿 0.372,短脚锦鸡儿

图6 锦鸡儿属灌木对植物群落的灌丛效应 ($n=5$)Fig.6 Shrub effect of *Caragana* on plant community

0.309)。5个锦鸡儿属灌木种中,仅垫状锦鸡儿对土壤线虫物种丰度有显著促进作用;5种灌木均显著促进了土壤线虫多度和土壤线虫群落(土壤线虫群落的灌丛效应分别是柠条锦鸡儿0.277,狭叶锦鸡儿0.282,荒漠锦鸡儿0.191,垫状锦鸡儿0.301,短脚锦鸡儿0.271)。虽然不同的灌木种对细菌和真菌(丰度和多度)的作用种间差异很大,但是对土壤生物总群落的作用灌木种间差异不显著,其大小变化趋势是垫状锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>柠条锦鸡儿>短脚锦鸡儿>荒漠锦鸡儿(图7)。

2.6 水分、营养和生物过程之间的相互关系及其在阻止草地沙漠化中的效应

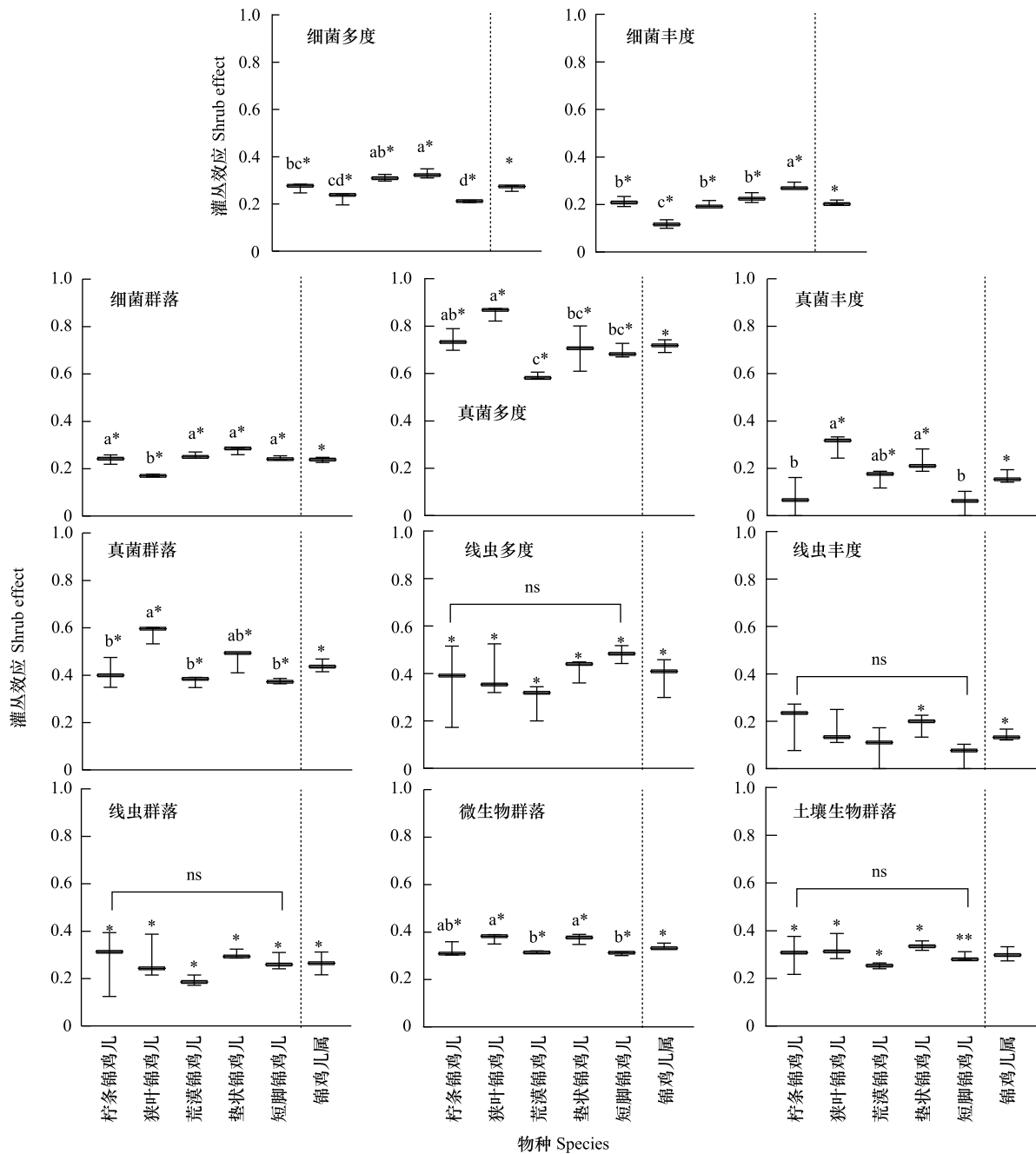
结构方程模型分析结果显示,土壤湿度与土壤营养呈正相关;土壤营养对土壤微生物和林下植物有正效应;林下植物对土壤酶和土壤线虫有正效应,但对土壤微生物显示负效应;土壤微生物对土壤线虫有正效应,但对土壤酶呈负效应;土壤酶对土壤营养有正效应。这些说明灌木对这些过程的影响有密切关系(图8)。

土壤湿度、土壤营养、林下植物和土壤微生物对阻止草地沙漠化有正效应,说明锦鸡儿属灌木通过促进土壤、水分和生物过程阻止草地沙漠化。其中水分过程贡献最大,路径系数为0.43;土壤营养和林下植物次之,路径系数分别为0.39和0.34;土壤微生物贡献较小,路径系数0.20(图8)。

3 讨论

3.1 锦鸡儿属灌木提高土壤湿度、改善土壤营养和促进地上地下生物群落效应

锦鸡儿属灌木提高了土壤对降水的截留能力(图3)。原因是:(1)锦鸡儿属灌木-草本植物群落改变了浅层土的土壤结构和性质,使土壤的渗透性更强,可以吸收和保留更多的水分^[22],减少了雨水径流和下渗^[23];(2)灌-草群落中的浅根系草本植物和深根系灌木能够截留降水。锦鸡儿属灌木提高了土壤含水量(图3),在科尔沁沙地的人工栽培小叶锦鸡儿(*C. microphylla*)林中也得到同样的结果^[13,15]。其原因除了上述截留降水,还有灌丛的遮阴作用降低了温度和风速,提高丛内湿度^[24],减少了蒸腾和蒸发;除此之外,灌木的水力提

图7 锦鸡儿属灌木对土壤生物群落的灌丛效应($n=3$)Fig.7 Shrub effect of *Caragana* on soil biota community

升作用也有一定贡献^[25—27]。

不同灌木种在改善土壤水分状况方面作用不一致(图3)。柠条锦鸡儿和狭叶锦鸡儿灌丛生物量大、根系发达,灌丛下凋落物多,改善了土壤营养(图4),这些因素提高了土壤持水能力;另外,这两种灌木灌丛结构致密,减少蒸腾,所以丛下土壤保持了更高的湿度。短脚锦鸡儿和荒漠锦鸡儿灌丛生物量小,根系稀疏,丛下凋落物少,土壤营养较低(图4),而且灌丛结构疏松,地表蒸发大,所以灌丛土壤水分状况不如前两种。

锦鸡儿属灌木有固氮能力,能提高土壤氮含量(图4),这些氮素可以被非豆科植物利用^[28],促进灌-草群落生长。群落中植物生长过程中利用土壤和大气的无机物合成有机质并通过凋落物和根系分泌物进入土壤,提高了荒漠土有机质含量和营养物质含量(图4);后者促进了土壤生物群落,加速了土壤代谢(图5),提高土

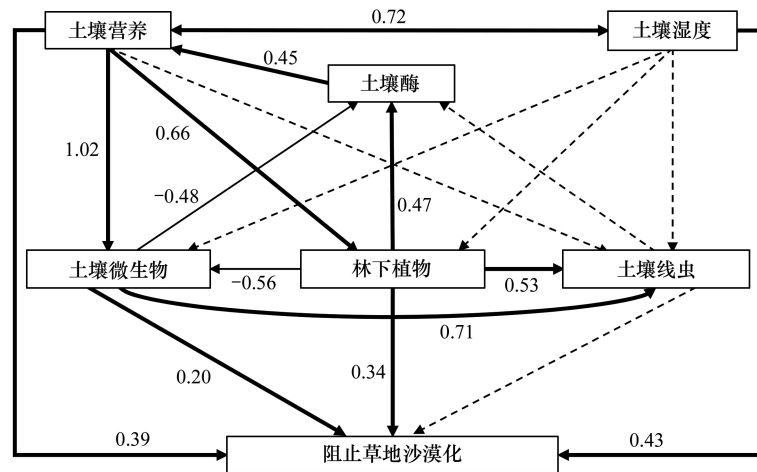


图8 锦鸡儿属灌木通过水分、营养和生物过程阻止干旱草地沙漠化的结构方程模型($n = 15$)

Fig.8 Structural equation modeling showing the effects of water, nutrition and organism processes on preventing arid grasslands from changing into deserts by *Caragana* shrubs ($n = 15$)

实线表示显著效应路径($P < 0.05$),数值表示路径系数;虚线表示无显著效应路径

壤营养有效性。在沙地上栽植锦鸡儿属灌木也导致土壤营养物质(有机质、总氮磷钾和有效氮磷钾)增加^[13,15—16,29—32],土壤沙粒降低和团聚体含量增加^[15,29,33],土壤酶(脲酶、磷酸单酯酶、蛋白酶、脱氢酶和多酚氧化酶)活性升高^[15]。

不同灌木种对土壤营养的促进作用不同(图4),关键影响因素是灌丛生物量。狭叶锦鸡儿和柠条锦鸡儿生物量大,其生长发育过程中产生的凋落物和根系分泌物多,所以它们对土壤营养的促进作用大;垫状锦鸡儿和荒漠锦鸡儿生物量小,因此对土壤营养的促进作用小。

锦鸡儿属灌木能改变微环境^[15,24,34],并通过微环境改善效应和抗取食效应促进丛内植物生长发育^[35]。锦鸡儿属灌木提高土壤湿度(图3)和改善土壤营养效应(图4)也有利于植物在灌丛内或灌丛周围定居,这些因素促进灌丛区植物群落生长(图6)。在科尔沁沙地上栽植小叶锦鸡儿灌木也提高了灌丛斑块内草本植物的物种多样性^[13—14,36]和土壤种子密度^[37]。这些植物群落通过凋落物和根系分泌物为土壤生物提供丰富的食物和友好的生存环境,促进土壤微生物群落(图7)^[38—39]和土壤线虫群落(图7)^[40—42]。更高的土壤生物群落多样性加速了营养循环(图5),反过来又促进了植物群落生长。

不同灌木种对林下植物的促进作用不一致(图6),主要归因于灌丛结构差异。短脚锦鸡儿和荒漠锦鸡儿灌丛比较稀疏,给其它植物留下更多的空间,所以它们对草本植物促进作用大。相对于前2个种,柠条锦鸡儿灌丛高且致密、内部空间小、阳光不足,垫状锦鸡儿灌丛结构致密、内部空间小,所以后2种灌木对草本植物的促进作用小。不同灌木种对地下生物的促进作用(图7)与其灌丛生物量和根系结构有关。垫状锦鸡儿根系范围小、密集,狭叶锦鸡儿和柠条锦鸡儿灌丛生物量大、根系紧凑,这3种灌木给土壤生物提供了较丰富的食物资源,所以对地下生物的促进作用大。荒漠锦鸡儿灌丛面积大而结构稀疏,根系生物量小,所以对地下生物的促进作用小。

3.2 锦鸡儿属灌木阻止干旱草地沙漠化的生态过程

研究区常年大风,大于7—8级的大风日数达47 d/a^[43],沙土在大风作用下容易形成移动沙丘。锦鸡儿属灌木是当地的主要植被,它们通过克隆繁殖形成庞大的无性系灌丛(图1)^[44—45],地上较致密的冠层结构加上灌丛内部的草本植物能固定流沙、降低风速,阻止沙物质运动^[24],地下庞大的根系能改善土壤营养、促进土壤生物群落,进而固着土壤(图2)。

水是荒漠区生物群落的关键因子,保住水就保育了生态系统。锦鸡儿属灌木提升了浅层土对降水的截留能力,提高了土壤含水量。浅层土壤湿度对草本植物的定居、生长和发育起着关键作用。这种水分格局保证

了更多的水分用于生物群落,为形成稳定的锦鸡儿属灌木-草本植物群落创造了良好条件,而灌-草群落是防止草地变成沙漠的主要因素^[1,3]。结构方程模型分析也证明,锦鸡儿属灌木导致的水分效应是阻止草地沙漠化的最重要因素(路径系数 PC 0.43,图 8)。

研究地区的土壤是棕灰荒漠土,有机质含量很低,土壤结构松散,难以形成土壤团粒结构,极易形成流沙,在风力作用下形成沙漠景观。锦鸡儿属灌木提高了荒漠土中的有机质和营养物质含量(图 4);后者促进了生物群落,加速了土壤代谢(图 5),提高土壤营养有效性。这些过程有利于土壤团粒结构形成,阻止了土壤沙化。结构方程模型分析显示,锦鸡儿属灌木改善土壤营养效应是阻止草地沙漠化的重要因素(PC 0.39,图 8)。如果锦鸡儿属灌木退化,表层土壤结构破坏,沙质露出地面便形成沙漠景观。

植被覆盖是避免荒漠草原沙漠化的有效办法,因为植被能防止沙物质运动形成移动沙丘。在极端干旱和贫瘠的荒漠草原上,草本植物很难独立生存,而锦鸡儿属灌木的存在创造了条件,提高了灌丛内部和周围地上地下生物多度和丰度(图 6,图 7),从而形成相对稳定的灌-草-地下生物群落结构。灌-草-地下生物群落组成了荒漠区主要的生物群落,在荒漠草原的地上形成 10%—20%的盖度,地下形成植物根系-土壤生物-土壤颗粒复合体,防止草原退化为沙漠。我们的研究证明,锦鸡儿属灌木通过促进生物过程而阻止草地沙漠化(林下植物 PC 0.34,土壤微生物 PC 0.20,图 8)。如果灌木退化,草原的生物群落将会崩溃;当植被盖度低于 5%,便形成沙漠。

总之,在极端干旱的荒漠草地上,锦鸡儿属灌木能够提高土壤湿度,改善土壤营养和土壤代谢,促进林下植物群落和土壤生物群落的构建,进而减轻风蚀和固结土壤,达到阻止干旱草地沙漠化的生态效应。灌丛引起的土壤水分、土壤营养、生物和沙土流动性 4 个相互联系的过程建立了正相互作用,形成了阻止荒漠草原退化为沙漠的主要机制。锦鸡儿属灌木是阻止干旱区草地沙漠化的守卫者,灌木衰退必然导致脆弱生态系统崩溃,随之而来的是土地沙漠化。这些结果提示,可以在脆弱的荒漠草原区栽植锦鸡儿属灌木,促进生物群落构建,防止沙漠侵蚀草原。

虽然 5 个灌木种对上述 4 个过程都有积极效应,但是这些过程并不完全同步,有近一半的过程无相关性,甚至出现负相关(图 8)。出现这个现象的原因是每个灌木种对不同生态过程的效应各有优劣。这些结果从 5 个灌木种对每个变量的灌丛效应排序中可以体现出来(图 3—图 7)。例如,与其它种相比,柠条锦鸡儿在固土、保水、改善土壤营养和提高土壤代谢方面表现明显优势,狭叶锦鸡儿在保水、改善土壤营养和促进地下生物群落方面显示优势,荒漠锦鸡儿在固土和促进林下植物群落显示优势,短脚锦鸡儿在提高土壤代谢和促进林下植物群落方面优势明显,垫状锦鸡儿在促进地下生物群落方面有优势。这些特异性是 5 个灌木种共存于荒漠草原区的原因之一。在 5 种锦鸡儿属灌木种中,柠条锦鸡儿优势更大,建议在防风固沙和防止水土流失生态工程中推广使用。

参考文献(References):

- [1] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner B L, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [2] 何磊. 基于遥感方法的阿拉善盟荒漠化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [3] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 1-9.
- [4] 马成仓, 高玉葆, 郭宏宇, 吴建波, 王金龙. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属(*Caragana*)优势种的形态适应特征. *生态学报*, 2006, 26(7): 2308-2312.
- [5] 李爱平, 王晓江, 杨小玉, 张雷. 库布齐沙漠几种沙生灌木叶解剖结构耐旱特征研究. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1405-1410.
- [6] 王晓江, 贺康宁, 唐道峰. 库布齐沙漠几种旱生灌木耗水特性研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 116-121.
- [7] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y, Wang J L, Wu J B, Xu J S. Physiological adaptations of four dominant *Caragana* species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(3): 247-254.
- [8] Ma C C, Guo H Y, Wu J B, Wang J L, Qi S X, Wei Y R, Gao Y B. Acclimation of photosynthetic traits of *Caragana* species to desert environment in Inner Mongolian Plateau. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28(1): 87-101.
- [9] 解李娜, 魏亚冉, 马成仓, 李清芳, 高玉葆. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属植物水力结构的变化. *生态学报*, 2015, 35(6): 1672-1678.
- [10] 张建华, 马成仓, 刘志宏, 高玉葆. 干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策. *生态学报*, 2011, 31(8): 2132-2138.
- [11] Xie L N, Ma C C, Guo H Y, Li Q F, Gao Y B. Distribution pattern of *Caragana* species under the influence of climate gradient in the Inner Mongolia region, China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(3): 311-323.

- [12] Xie L N, Guo H Y, Ma C C. Alterations in flowering strategies and sexual allocation of *Caragana stenophylla* along a climatic aridity gradient. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33602.
- [13] Su Y Z, Zhao H L. Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy Land, north China. *Ecological Engineering*, 2003, 20(3): 223-235.
- [14] Lu R, Zheng J Y, Jia C, Liu Y, Huang Z, He H H, Han F P, Wu G L. Nurse effects of patch-canopy microhabitats promote herbs community establishment in sandy land. *Ecological Engineering*, 2018, 118: 126-133.
- [15] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, Jiang Y, Liang W J, Cui Z B. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(1): 78-85.
- [16] Li Q, Jia Z, Zhu Y, Wang Y, Li H, Yang D, Zhao X. Spatial heterogeneity of soil nutrients after the establishment of *Caragana intermedia* plantation on sand dunes in alpine sandy land of the Tibet Plateau. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0124456.
- [17] 丁雪. 内蒙古自治区土地荒漠化动态变化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [18] 刘超. 内蒙古阿拉善东南部地区近二十年来植被覆盖度及生态环境研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] Vigliarcho D R, Schmitt R V. On the methodology of nematode extraction from field samples; baermann funnel modifications. *Journal of Nematology*, 1983, 15(3): 438-444.
- [22] Segoli M, Ungar E D, Shachak M. Shrubs enhance resilience of a semi-arid ecosystem by engineering and regrowth. *Ecohydrology*, 2008, 1(4): 330-339.
- [23] Archer N A L, Quinton J N, Hess T M. Patch vegetation and water redistribution above and below ground in south-east Spain. *Ecohydrology*, 2012, 5(1): 108-120.
- [24] 刘哲, 梅续芳, 张玮, 马成仓, 李清芳. 荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛的微气候特征. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 308-312.
- [25] Muñoz M R, Squeo F A, León M F, Tracol Y, Gutiérrez R. Hydraulic lift in three shrub species from the Chilean coastal desert. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(5): 624-632.
- [26] Kitajima K, Allen M F, Goulden M L. Contribution of hydraulically lifted deep moisture to the water budget in a Southern California mixed forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1561-1572.
- [27] Prieto I, Ryel R J. Internal hydraulic redistribution prevents the loss of root conductivity during drought. *Tree Physiology*, 2014, 34(1): 39-48.
- [28] Ouyang S N, Tian Y Q, Liu Q Y, Zhang L, Sun Y, Xu X L, Liu Y H. Symbiotic nitrogen fixation and interspecific transfer by *Caragana microphylla* in a temperate grassland with ^{15}N dilution technique. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 221-227.
- [29] Su Y Z, Zhang T H, Li Y L, Wang F. Changes in soil properties after establishment of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla* on shifting sand dunes in semiarid Horqin sandy land, northern China. *Environmental Management*, 2005, 36(2): 272-281.
- [30] Shang W, Li Y Q, Zhao X Y, Zhang T H, Ma Q L, Tang J N, Feng J, Su N. Effects of *Caragana microphylla* plantations on organic carbon sequestration in total and labile soil organic carbon fractions in the Horqin Sandy Land, northern China. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(5): 688-700.
- [31] Cao C Y, Jiang S Y, Ying Z, Zhang F X, Han X S. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1467-1475.
- [32] Liu J B, Zhang Y Q, Wu B, Qin S, Jia X, Feng W. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus along a chronosequence of *Caragana microphylla* plantation, northwestern China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(2): 385-391.
- [33] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, Wu B, Zhang Y Q, Qin S G, Bao Y F, Yu M H, Liu Y D. Fractal approach to estimating changes in soil properties following the establishment of *Caragana korshinskii* shelterbelts in Ningxia, NW China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 236-243.
- [34] 贺山峰, 邱兰兰, 蒋德明, 骆永明. 科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿群落小气候效应研究. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 145-148.
- [35] Xie L N, Guo H Y, Liu Z, Gabler C A, Chen W Z, Gu S, Ma C C. Shrubs facilitate recruitment of *Caragana stenophylla* Pojark: microhabitat amelioration and protection against herbivory. *Annals of Forest Science*, 2017, 74(4): 70.
- [36] Ballantyne M, Pickering C M. Shrub facilitation is an important driver of alpine plant community diversity and functional composition. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(8): 1859-1875.
- [37] Li X, Jiang D, Zhou Q, Oshida T. Soil seed bank characteristics beneath an age sequence of *Caragana microphylla* shrubs in the Horqin Sandy Land region of northeastern China. *Land Degradation & Development*, 2014, 25(3): 236-243.
- [38] 姚金冬. 不同年龄小叶锦鸡儿群落土壤微生物多样性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [39] 曹成有, 姚金冬, 韩晓妹, 张颖. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿固沙群落土壤微生物功能多样性. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2309-2315.
- [40] Su Y Z, Wang X F, Yang R, Yang X, Liu W J. Soil fertility, salinity and nematode diversity influenced by *Tamarix ramosissima* in different habitats in an arid desert oasis. *Environmental Management*, 2012, 50(2): 226-236.
- [41] Guan P T, Zhang X K, Yu J, Ma N N, Liang W J. Variation of soil nematode community composition with increasing sand-fixation year of *Caragana microphylla*: Bioindication for desertification restoration. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 93-101.
- [42] Jiang D M, Li Q, Liu F M, Jiang Y, Liang W J. Vertical distribution of soil nematodes in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy Land, Northeast China. *Ecological Research*, 2007, 22(1): 49-56.
- [43] 周志宇, 颜淑云, 秦彧, 邹丽娜. 阿拉善干旱荒漠区灌木多样性的特点. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 146-150.
- [44] Xie L N, Guo H Y, Gabler C A, Li Q F, Ma C C. Changes in spatial patterns of *Caragana stenophylla* along a climatic drought gradient on the Inner Mongolian Plateau. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0121234.
- [45] Wang Z W, Xie L N, Prather C M, Guo H Y, Han G D, Ma C C. What drives the shift between sexual and clonal reproduction of *Caragana stenophylla* along a climatic aridity gradient? *BMC Plant Biology*, 2018, 18(1): 91.