

# 新疆卡拉麦里山保护区土壤黏粒与含水量的关系及其对植物多样性的影响<sup>①</sup>

彭黄叶<sup>1,2</sup>, 孙刚<sup>3</sup>, 王旭<sup>3</sup>, 谢立杰<sup>4</sup>, 严彩玉<sup>1,2</sup>, 罗玲吕<sup>1,2</sup>, 韩炜<sup>1,2\*</sup>

(1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 3 新疆林科院园林绿化研究所, 乌鲁木齐 830054; 4 新疆生产建设兵团第五师畜牧兽医工作站, 新疆双河 833408)

**摘要:** 以卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区的红砂群落和梭梭群落为研究对象, 定期在植物生长季节对固定样方进行土壤和植物调查, 分析 0~100 cm 土层中土壤黏粒含量、水分含量及地表植物多样性的动态变化。结果表明: 不同植物群落的土壤理化性质与植被多样性显著不同。红砂群落下的土壤黏粒含量与分形维数在各土层均高于梭梭群落, 其中红砂群落下两个指标的最大值均位于 40~60 cm 土层, 分别为 3.40% 和 2.73, 而梭梭群落下两个指标的最大值均位于 0~20 cm 表层, 分别为 2.22% 和 2.69。红砂群落下的土壤黏粒含量和含水量重心位于较浅土层, 平均深度分别为 28.7 cm 和 34.5 cm, 而梭梭群落下平均深度分别为 29.8 cm 和 36.0 cm。红砂群落下的土壤含水量普遍较高, 尤其在干旱季节能有效保持水分, 有利于早春浅根性植物的生长和生态系统的稳定。红砂群落因较优的土壤结构和水分保持能力, 具备更好的植被状况, 物种多样性指数及科属种数量均高于梭梭群落, 分别为 12 科 17 属 20 种和 8 科 10 属 13 种。土壤黏粒含量和水分含量与植物多样性之间呈正相关, 说明土壤黏粒含量和含水量不仅是评价土壤质地和水分状况的关键指标, 同时也是植物多样性评价的重要参考, 为卡拉麦里山区域的生态保护提供了重要参考依据。

**关键词:** 土壤黏粒含量; 土壤含水量; 植物多样性; 分布重心; 分形维数; 卡拉麦里山

中图分类号: S152.3 文献标志码: A

## Relationship Between Soil Clay and Moisture and Its Impact on Plant Diversity in Karamaili Mountain Nature Reserve, Xinjiang

PENG Huangye<sup>1,2</sup>, SUN Gang<sup>3</sup>, WANG Xu<sup>3</sup>, XIE Lijie<sup>4</sup>, YAN Caiyu<sup>1,2</sup>, LUO Linglü<sup>1,2</sup>, HAN Wei<sup>1,2\*</sup>

(1 Faculty of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas, Urumqi 830054, China; 3 Institute of Landscaping, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830054, China; 4 Xinjiang Production and Construction Corps Fifth Division Livestock and Veterinary Workstation, Shuanghe, Xinjiang 833408, China)

**Abstract:** *Reaumuria songarica* and *Haloxylon ammodendron* communities in the Karamaili Mountain Hoofed Wildlife Nature Reserve were taken as the study objects. Regular soil and plant surveys were conducted on fixed plots during the plant growth season to analyze the dynamic changes in soil clay content, moisture, and surface plant diversity in the 0–100 cm soil layer. The results showed that soil physicochemical properties and vegetation diversity of different plant communities were significantly different. Soil clay content and fractal dimension under *Reaumuria songarica* were higher than those under *Haloxylon ammodendron* in all soil layers. The maximum values of the two indicators were located in 40–60 cm soil layer under *Reaumuria songarica* (3.40% and 2.73, respectively), and located in 0–20 cm surface layer under *Haloxylon ammodendron* (2.22% and 2.69, respectively). The gravity centers of soil clay content and moisture under *Reaumuria songarica* were located in the shallower soil layer, with an average depth of 28.7 cm and 34.5 cm, respectively, which were 29.8 cm and 36.0 cm, respectively under *Haloxylon ammodendron*. Soil moisture under *Reaumuria songarica* was generally high, especially during the dry season, which is beneficial for the growth of shallow rooted plants in early spring, and the stability of the ecosystem due to its high water

①基金项目: 2023 年新疆维吾尔自治区林业发展补助资金 (XJLYKJ-2023-06) 和湖北省重点研发计划援疆项目(2023EGA123)资助。

\* 通信作者(hanweiaaa@163.com)

作者简介: 彭黄叶(1999—), 女, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要研究方向为绿洲生态恢复与建设。E-mail: penghuangye0418@163.com

retaining capacity, indicating *Reaumuria songarica* has better vegetation conditions due to its superior soil structure and water retaining capacity, whose species diversity index and the numbers of families, genera, and species were higher than those of the *Haloxylon ammodendron*, with 20 species belonging to 17 genera in 12 families, and 13 species belonging to 10 genera in 8 families, respectively. Soil clay content and moisture had positive correlations with plant diversity, indicating that soil clay content and moisture are not only the key indicators for evaluating soil texture and moisture status, but also important references in evaluating plant diversity, which provide important references for ecological protection in the Karamaili Mountain area.

**Key words:** Soil clay content; Soil moisture; Plant diversity; Distribution center of gravity; Fractal dimension; Kalamaili Mountain

新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区(以下简称卡山保护区)是我国西北干旱区极为重要的野生动物保护地之一。然而,该保护区植被组成较为简单、分布稀疏,且水资源短缺,构成了一个复杂而脆弱的生态系统<sup>[1-2]</sup>。其中土壤是生态系统中至关重要的组成部分<sup>[3-4]</sup>,为植物的生长提供了所需的水分和养分<sup>[5]</sup>。土壤粒径和土壤含水量是土壤性质的关键指标,反映了土壤颗粒大小组成和水分状况,这两个指标与植物多样性之间存在着复杂而密切的关系,对生态系统功能和动态变化起着重要作用<sup>[6-7]</sup>。由于土壤黏粒比例的不同,形成了不同的土壤持水力,进而形成了不同土层深度水分含量不同,从而表现出不同的植物多样性。在卡山保护区,由于受到地形、气候和植被等因素的影响,土壤粒径分布和含水量可能会出现显著的空间异质性和群落差异性<sup>[8]</sup>。

国内外学者关于土壤黏粒含量、土壤含水量和植物多样性的研究众多。土壤质地对土壤的通气性、保水性、保肥性及耕作难易程度有重要影响<sup>[9]</sup>。解文艳和樊贵盛<sup>[10]</sup>研究发现土壤颗粒大小与入渗能力间呈对数递减关系。李雪转和樊贵盛<sup>[11]</sup>研究发现雨水入渗速率与黏粒含量间呈显著的幂函数负相关关系。贾东于等<sup>[12]</sup>认为土壤各层含水量的差异主要与土壤密度和土壤粉尘的成分含量有关。王德等<sup>[13]</sup>和宛倩等<sup>[14]</sup>研究发现多重分形参数可以作为反映土壤物理性质和土壤质量的潜在性指标。土壤质量和水源涵养能力不仅影响植物的生长发育,还对物种多样性有显著影响。武晶<sup>[15]</sup>和何欣月等<sup>[16]</sup>认为土壤水分对植物群落多样性、生物量有直接影响,一定的土壤粒径背景对植物多样性有间接影响。Wang 等<sup>[17]</sup>研究发现,植物生物量和物种丰富度与大团聚体性质呈现显著关联。孙杰<sup>[18]</sup>研究表明土壤粒径、土壤养分、电导率等土壤因子对植物群落分布有较大影响。

尽管前人对土壤粒径和土壤含水量分别开展了大量研究,但在卡山保护区,关于二者和地表生物多样性之间相关关系的研究较少。本文在植物生长季,

通过对固定的植物样方采样,获取土壤机械组成、含水量垂直位置以及地表生物多样性的数据,用相关分析法,分析土壤黏粒含量分布重心与土壤含水量分布重心的空间分布格局及其与植物群落的关联性,以期为卡山保护区的生态环境管理和保护提供依据。

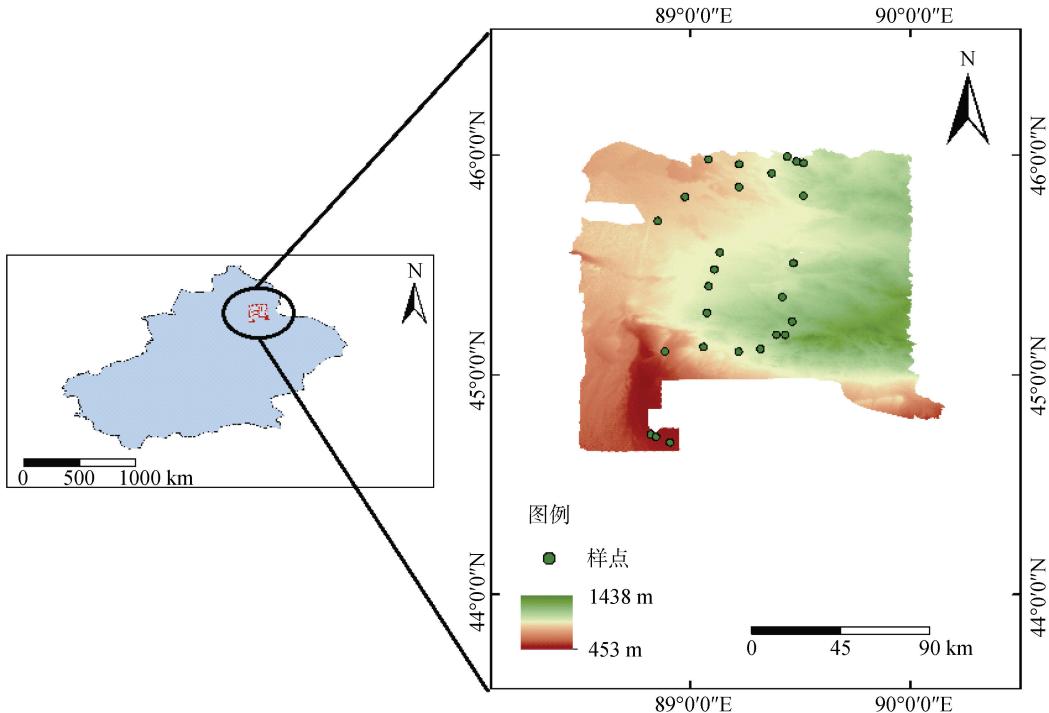
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

卡山保护区位于我国新疆维吾尔自治区准噶尔盆地东缘,是准噶尔盆地温带荒漠戈壁生态地理区的典型代表,地理坐标为 88°26'58"E ~ 90°09'43"E, 44°38'59"N ~ 46°03'43"N, 总面积约 1.47 万 km<sup>2</sup>(图 1)。研究区属中温带大陆性干旱气候,具有明显的季节性特征,年平均气温为 2.4 °C, 年平均降水量为 159.1 mm, 其中雨季(6—8 月)月平均降水量为 27.2 mm, 旱季(4—5 月、9—10 月)为 16.2 mm, 而年蒸发量高达 2 090.4 mm<sup>[19]</sup>。卡山保护区内植物群落组成简单且分布稀疏,主要由超旱生和旱生的灌木、小半灌木及旱生的一年生草本、多年生草本和短命植物等荒漠植物组成<sup>[20]</sup>。保护区内的主要植物种类包括: 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、刺木蓼(*Atraphaxis spinosa*)、准格尔沙蒿(*Artemisia songarica*)、刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)、盐生假木贼(*Anabasis salsa*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、白茎绢蒿(*Seriphidium terrae-albae*)等<sup>[20]</sup>, 其中红砂群落和梭梭群落作为卡拉麦里山的典型植物群落,在土地沙漠化防治中发挥着重要作用。

### 1.2 试验设计

本试验选择红砂群落和梭梭群落两种典型植物群落为调查对象,设置共 26 个样地,每个样地设置 3 个 20 m × 20 m 的样方,每个样方间距离不小于 100 m,每个样方设 1 个取样点。于 2023 年 4—10 月采用土钻法进行每月一次的土壤采样,设计采样深度为 100 cm,按每 20 cm 分层采集土壤样本。取适量土



(该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1815 号的标准地图制作, 底图无修改)

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

样装入铝盒, 用于测定土壤含水量, 另一部分放入密封袋内, 用于土壤粒度的测定分析。同步调查植物多样性, 包括科、属、种的数量, 并计算多样性指数。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 土壤粒度分析** 采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定土壤粒径分布(PSD)。土壤粒径分级采用美国制的土粒分级标准(USDA), 即分为黏粒( $0 \sim 2 \mu\text{m}$ ), 粉粒( $2 \sim 50 \mu\text{m}$ )和砂粒( $50 \sim 2000 \mu\text{m}$ )<sup>[9]</sup>。

**1.3.2 土壤含水量测定** 采用烘干法测定土壤质量含水量, 计算公式为:

$$\text{土壤含水量}(\%) = \frac{\text{原土质量} - \text{烘干土质量}}{\text{烘干土质量}} \times 100 \quad (1)$$

### 1.3.3 土壤黏粒含量分布重心和土壤含水量分布重

心的确定 重心概念源自物理学, 是指研究区域内特定时刻某一特定属性值在空间平面上力矩达到平衡的点<sup>[21]</sup>, 计算公式为:

$$Z_g = \frac{\sum (W_i \cdot Z_i)}{\sum W_i} \quad (2)$$

式中:  $Z_g$  为分段或分部重心距基线高度(cm);  $W_i$  为各土层段土壤黏粒含量或土壤质量含水量(%);  $Z_i$  为各土层段的重心距基线的高度(cm)。

### 1.3.4 土壤分形维数( $D$ )计算

根据王国梁等<sup>[22]</sup>推

导的土壤颗粒体积单重分形理论模型, 计算土壤分形维数  $D$ 。计算公式为:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left( \frac{R}{\lambda_V} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中:  $V(r < R)$  为所有小于  $R$  的土粒的粒径体积之和( $\mu\text{m}^3$ );  $V_T$  为土壤颗粒的总体积(定值 100%);  $R$  为某一粒径特征尺度, 计算时用该区间上下限算术平均值表示;  $\lambda_V$  为土壤粒径分级中最大的粒级值( $\mu\text{m}$ );  $D$  为土壤颗粒的体积分形维数<sup>[23]</sup>。计算时将等式两侧取对数, 通过对数曲线的拟合斜率可求得  $D$  值。

**1.3.5 物种多样性计算** 通过  $\alpha$  多样性来描述物种多样性, 其中包括 Margalef 指数( $M$ )、Shannon-Wiener 指数( $H$ )、Simpson 指数( $F$ )和 Alatalo 指数( $E$ )<sup>[24]</sup>, 计算公式为:

$$M = \frac{S-1}{\ln N} \quad (4)$$

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (5)$$

$$F = 1 - \ln \left[ \sum_{i=1}^S P_i^2 \right] \quad (6)$$

$$E = \frac{1 / \left( \sum_{i=1}^S P_i^2 \right) - 1}{\exp(-P_i \ln P_i) - 1} \quad (7)$$

式中:  $S$  为样地中的物种总数;  $N$  为样地中的个体总数;  $P_i$  为第  $i$  种植物的个体数占总个体数之比。

#### 1.4 数据处理

使用 SPSS Statistic 26 软件进行显著性检验和相关性分析,采用 T 检验和 ANOVA 分析不同群落下土壤粒径分布和含水量的显著差异,并通过皮尔逊相关系数评估各变量间的相关性。利用 ArcMap 10.8.1 软件进行研究区空间数据处理和地图制作,描述研究区的地理位置和样地分布。利用 Origin 2021 软件绘制土壤粒径分布和含水量的时间序列图、散点图及相关性热图等,以显示不同植物群落下土壤黏粒与水分含量及植物多样性之间的关系。

### 2 结果与分析

#### 2.1 土壤粒径分布状况

在不同的群落类型和土层深度下,土壤的粒径分布及其分形维数存在差异(表 1)。红砂群落下土壤黏粒含量随土层深度的增加呈现出先增加后降低的变化趋势,土壤黏粒含量在 40~60 cm 土层最高,为 3.40%,在 80~100 cm 土层最低,仅为 1.14%;梭梭群落下土壤黏粒含量随土层深度增加呈现持续下降的变化趋势。两个群落土壤粉粒含量随土层深度增加均呈现出先增加后降低的变化趋势,且均在 20~40 cm 土层最高,在 80~100 cm 土层最低。相反,

两种群落类型下土壤砂粒含量随土层深度增加均表现出先降低后增加的变化趋势,均在 20~40 cm 土层最低,在 80~100 cm 土层最高。在各土层,红砂群落黏粒和粉粒含量均高于梭梭群落,而砂粒含量则低于梭梭群落。两个群落土壤分形维数均与其黏粒含量变化趋势一致,随土层深度增加先提高后降低,介于 2.59~2.73;红砂群落平均土壤分形维数(2.70)略高于梭梭群落(2.67)。

#### 2.2 土壤含水量分布状况

土壤含水量随土层深度的垂直变化如图 2 所示(由于雨季工作安排的不同及人员的不足,未采集 80 cm 以下土层土壤的相关数据),雨季土壤平均含水量为 3.41%,大于旱季的 2.67%。旱季随土层深度增加,两个群落土壤含水量均表现为先增加后降低再增加的变化趋势,且均在 20~40 cm 土层土壤含水量最大,在 0~20 cm 土层土壤含水量最小,其中 0~60 cm 土层是土壤含水量变化幅度较大的土层;且红砂群落土壤含水量在各土层均大于梭梭群落。雨季随土层深度增加,两个群落土壤含水量均呈现出先增加后降低的趋势,且均在 40~60 cm 土层最大,在 0~20 cm 土层最小,其中 0~40 cm 土层是土壤含水量变化幅度较大的土层;红砂群落土壤含水量除 0~20 cm 土层略低于梭梭群落,其余土层均高于梭梭群落,且相对而言,红砂群落土壤含水量增加量整体上大于梭梭群落。

表 1 两种典型群落的土壤粒径及分形维数分布  
Table 1 Soil particle size distributions and fractal dimensions under two typical communities

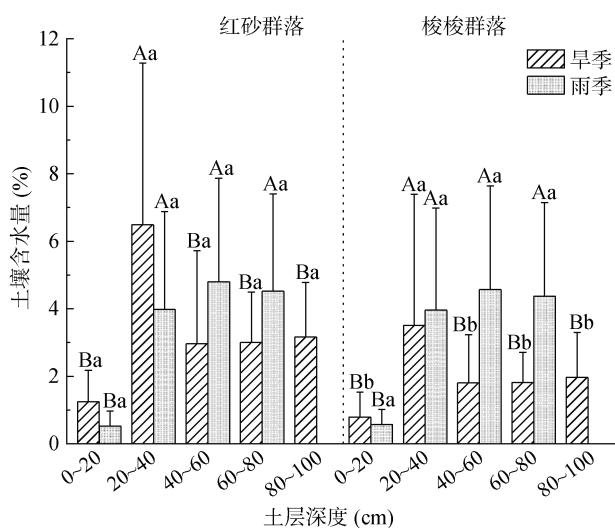
群落类型	土层深度 (cm)	土壤粒级体积含量(%)			分形维数
		黏粒	粉粒	砂粒	
红砂群落	0~20	2.37 ± 1.39 ABa	28.63 ± 15.48 Aa	69.00 ± 16.73 Ab	2.70 ± 0.21 B
	20~40	2.47 ± 1.94 ABa	32.46 ± 21.30 Aa	65.07 ± 22.81 Ab	2.72 ± 0.21 A
	40~60	3.40 ± 3.73 Aa	29.18 ± 16.08 Aa	67.42 ± 18.85 Ab	2.73 ± 0.19 A
	60~80	1.93 ± 2.00 ABa	25.45 ± 19.26 Aa	72.62 ± 20.82 Aa	2.69 ± 0.22 B
	80~100	1.14 ± 1.19 Ba	21.37 ± 16.03 Aa	77.49 ± 17.18 Ab	2.65 ± 0.25 C
	0~20	2.22 ± 1.90 Aa	25.62 ± 18.48 Ab	72.17 ± 20.23 Ba	2.69 ± 0.22 A
梭梭群落	20~40	2.10 ± 1.92 ABa	27.93 ± 22.08 Ab	69.96 ± 23.70 Ba	2.69 ± 0.22 A
	40~60	2.02 ± 2.87 ABb	22.32 ± 16.63 ABb	75.65 ± 18.81 ABa	2.68 ± 0.22 A
	60~80	1.45 ± 1.77 ABb	20.26 ± 16.08 ABa	78.28 ± 17.45 ABa	2.65 ± 0.24 B
	80~100	0.68 ± 0.96 Bb	12.74 ± 14.21 Bb	86.58 ± 15.14 Aa	2.59 ± 0.29 C

注: 同列数据大写字母不同表示同一群落不同土层土壤粒径含量及分形维数差异显著( $P<0.05$ ); 小写字母不同表示不同群落同一土层土壤粒径含量差异显著( $P<0.05$ )。

#### 2.3 土壤黏粒含量与土壤含水量的重心分布

两个群落土壤黏粒含量和含水量的重心分布如图 3 所示,在空间上存在一定的差异。两个群落的土壤含水量分布重心均深于各自的土壤黏粒含量分布

重心,但都集中在 20~40 cm 土层,其中红砂群落的土壤黏粒含量重心和含水量重心较梭梭群落更集中,且其平均深度更浅。两个群落黏粒含量重心集中分布在 24.7~32.6 cm 土层,红砂群落下土壤黏粒含量重



(图中大写字母不同表示同一群落不同土层旱季或雨季土壤含水量差异显著( $P<0.05$ )；小写字母不同表示不同群落同一土层旱季或雨季土壤含水量差异显著( $P<0.05$ ) )

图 2 两种典型群落旱季和雨季土壤不同深度含水量

Fig. 2 Soil moistures at different depths during dry and rainy seasons under two typical communities

心分布的平均土层深度约为 28.7 cm，梭梭群落则为 29.7 cm。两种植物群落在不同季节对土壤水分的利用表现出明显的季节性和植物特异性差异。旱雨两季两种植物群落下土壤含水量重心集中分布在 31.9 ~ 41.5 cm 土层，雨季土壤含水量重心的分布较旱季更

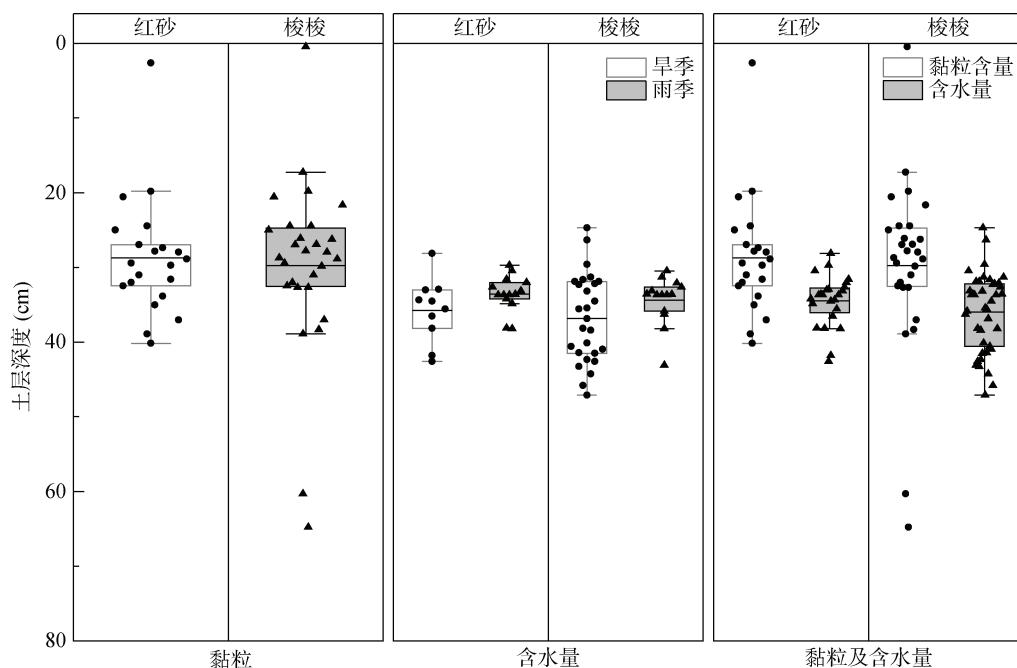
为集中且土层深度更浅，其中红砂群落的土壤含水量重心平均深度在旱季约为 35.8 cm，雨季约为 33.5 cm，而梭梭群落旱雨两季均深于红砂群落，旱季约为 36.8 cm，雨季约为 34.4 cm。

#### 2.4 两种植物群落间物种多样性的比较

实地群落调查结果表明(图 4)，红砂群落在物种多样性指数及科属种数量上均高于梭梭群落。其中红砂群落在 Margalef 指数和 Alatalo 指数上的表现尤为突出，分别为 0.82 和 0.56，显示出其在物种丰富度和均匀度上的优势。相比之下，梭梭群落在这些指数上的表现较低，尤其是在 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数上，仅分别为 0.22 和 0.30，显示出其在物种多样性和均匀度上的不足。红砂和梭梭作为灌木，红砂样地植物群落物种组成共 12 科 17 属 20 种，而梭梭样地植物群落物种组成共 8 科 10 属 13 种。

#### 2.5 土壤粒径、分形维数、含水量和植物多样性 的相关关系

由图 5 可知，红砂和梭梭两个群落下土壤黏粒与粉粒含量之间均呈显著正相关( $P<0.05$ )，而两者与砂粒含量之间则均呈极显著负相关( $P<0.01$ )；土壤含水量与其分形维数之间存在正向关联，且均与土壤黏粒和粉粒含量呈正相关，而与砂粒含量呈负相关；土壤分形维数与土壤黏粒含量、粉粒含量均呈极显著正相关( $P<0.01$ )，而与砂粒含量呈极显著负相关( $P<0.01$ )，



(散点表示单个样本的测量值；框图的上下边分别表示数据的上四分位数和下四分位数；框图的中间线表示平均值；误差线的上下边表示除异常值外的最小值和最大值)

图 3 两种典型群落下土壤黏粒含量与土壤含水量的重心分布

Fig. 3 Gravity center distributions of soil clay content and moisture under two typical communities

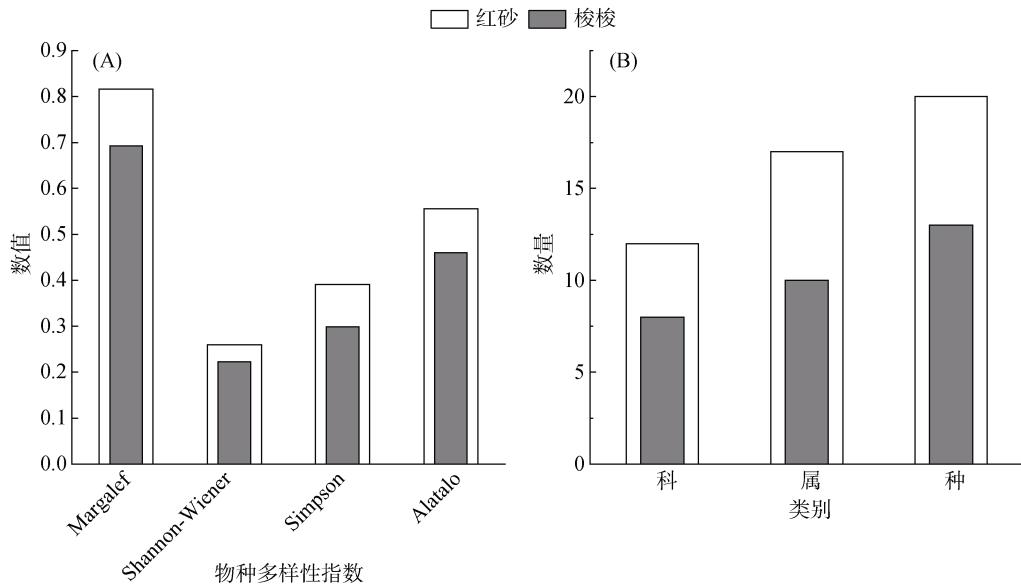
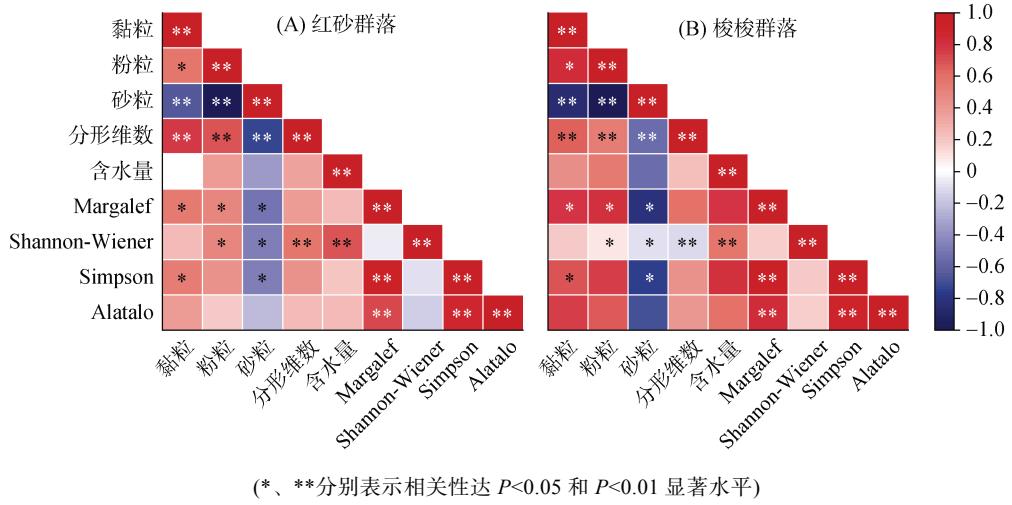


图4 两种群落间植物多样性  
Fig. 4 Plant diversities under two typical communities



(\*、\*\*分别表示相关性达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平)

图5 土壤粒径、分形维数、含水量和植物多样性间的相关系数  
Fig. 5 Correlation coefficients between soil particle size, fractal dimension, moisture and plant diversity

Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Alatalo 指数均与土壤黏粒和粉粒含量及土壤含水量呈正相关, 而与砂粒含量呈负相关。

### 3 讨论

#### 3.1 两种植物群落下土壤粒径及含水量分布状况

土壤蓄持水分潜能与土壤类型、粒径分布密切相关<sup>[25]</sup>。红砂群落中土壤黏粒与粉粒含量高于梭梭群落, 而砂粒含量较低。这一发现与锁才序等<sup>[26]</sup>和张阳灿等<sup>[27]</sup>关于土壤质地与水分保持能力的研究一致, 他们发现细粒物质不仅增大了土壤颗粒表面积, 还提高了土壤黏结性, 从而增强了土壤对水分的吸附固定能力<sup>[28]</sup>。这种特性有效减少了土壤水分的流失,

使得红砂群落的土壤平均含水量高于梭梭群落。

此外, 季节性降水对土壤水分也存在显著影响。汪星等<sup>[29]</sup>指出, 雨季降水显著增加了 40 ~ 60 cm 土层的含水量, 表明降水在较深土层的水分保持中发挥了重要作用。本文对红砂群落与梭梭群落土壤水分含量研究结果与此相符。尽管雨季的降水量显著高于旱季, 但由于气温升高, 0 ~ 20 cm 表层土壤的水分含量在雨季反而低于旱季。这与 Liu 等<sup>[30]</sup>的研究相符, 他们发现较高的气温促进了表层土壤的蒸发作用, 导致土壤水分在雨季加速流失。表明细粒物质、降水量和温度对土壤水分的保持具有重要作用。

本研究发现, 红砂群落在各土层的土壤分形维数均高于梭梭群落, 且土壤分形维数与土壤黏粒、粉粒

含量均呈现极显著正相关关系, 这与郭振宁等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。说明土壤分形维数受土壤颗粒含量的影响, 能表示土壤颗粒的组成情况及变化规律, 这充分说明分形维数可以作为评价土壤质量的重要指标。

红砂群落和梭梭群落的土壤黏粒含量和含水量分布重心都集中在 20~40 cm 土层。这一结果与王凤君等<sup>[32]</sup>的研究一致, 他们发现黏粒含量较高的土层可能会导致水分在垂直方向上的分布更加集中, 从而影响水分的运动和保持。程小曼等<sup>[33]</sup>指出, 土壤黏粒含量和含水量的分布重心都集中在较浅的土层中, 这可能与植物根系对水分的吸收能力有关。其中红砂群落的土壤黏粒含量和含水量重心较梭梭群落更集中于浅土层, 这可能是因为红砂灌丛在防风滞沙和养分积累方面的作用更为显著, 使得其根系倾向于在表层土壤中寻找适宜的水分和养分条件<sup>[34]</sup>。

### 3.2 两种植物群落物种多样性

红砂群落在物种多样性指数及科属种数量上均高于梭梭群落。这与张林静<sup>[35]</sup>的研究结果一致, 他们发现梭梭的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均低于红砂。这可能与梭梭的生态位宽度有关, 梭梭群落虽然也是重要的建群种, 但其生态位宽度较小, 导致其在适应土壤盐分方面具有一定的局限性, 从而限制了物种多样性的进一步提升。相比之下, 红砂则表现出较强的适应能力, 能够在干旱环境中通过其广泛的生态位宽度和较高的生物量维持较高的物种多样性。

孙艳霞<sup>[36]</sup>在阿拉善高原的研究中发现, 红砂群落的多样性指数在不同样地中波动性较大, 多样性水平较低, 尽管如此, 红砂群落的物种多样性指数仍高于梭梭群落。这可能是因为红砂在干旱环境中的抗逆性和生态可塑性较强, 使其能够在恶劣的自然条件下维持较高的物种多样性。此外, 许雅娟等<sup>[37]</sup>以及刘秉儒和李文金<sup>[38]</sup>也指出, 随着红砂植被盖度和地上生物量的增加, 群落的植物物种多样性逐渐增大, 红砂群落的 Shannon-Wiener 指数和 Alatalo 指数都表现得较为突出, 科属种数量也显示出其多样性优势。这意味着在干旱环境中, 红砂通过其冠层遮阴作用, 能够促进植被自然恢复, 从而提高物种多样性。

### 3.3 土壤黏粒、含水量对植物多样性的影响

在红砂群落和梭梭群落中, 植物多样性的 4 个指数与土壤黏粒含量、含水量间均呈现正相关性, 而与砂粒含量呈负相关, 这一结果与祁连山地区的研究一致<sup>[39]</sup>。这表明在该研究区, 土壤黏粒含量的高低会影响植物在不同气候条件下的水分获取能力, 进而影

响植物根系的生长和生态适应性<sup>[40-41]</sup>。此外, 尽管 Wu 等<sup>[42]</sup>指出土壤含水量与物种丰富度之间呈负相关关系, 认为过高的水分可能抑制植物生长, 但本研究的结果表明, 适宜的土壤含水量对植物的生长和繁殖至关重要, 特别是在干旱环境下, 过低或过高的水分均可能限制植物的生长, 影响植物种子的萌发及其生理过程。这一观点与张阳灿等<sup>[27]</sup>的研究相符, 他们指出水分的适度保持能够为植物提供理想的生长环境, 进而促进其繁殖和多样性。

土壤结构与水分的结合对早春浅根性植物尤其重要, 这些植物对水分的需求较为敏感。适宜的土壤结构和水分条件为这些植物提供了生存空间, 从而拓宽了植物群落的生态位宽度, 促进了植物多样性的增加。例如, 锁才序等<sup>[26]</sup>研究指出, 土壤结构的差异直接影响植物群落的水分获取能力, 进而影响其物种多样性。在红砂群落和梭梭群落中, 土壤粉粒和砂粒含量在 20~40 cm 土层处发生转折, 显示出土壤从表层到深层(0~100 cm)由细颗粒向粗颗粒过渡。这种土壤粒径分布的变化特征与 Liu 等<sup>[30]</sup>关于土壤质地对水分保持的研究一致, 他们发现细粒土壤能够显著提高土壤的水分保持能力, 尤其在干旱季节。因此, 这种土壤结构特性使得红砂群落的土壤在旱季具有较强的水分保持能力, 有助于其植物群落在干旱条件下维持较高的生物多样性。相比之下, 梭梭群落的土壤细粒物质含量较低, 水分保持能力较弱, 这可能导致其植物群落在旱季的生存压力较大, 从而表现出较低的物种多样性。

因此, 红砂群落和梭梭群落在物种多样性上的差异, 进一步验证了土壤结构和水分分布对植物多样性的影响。土壤的颗粒组成不仅影响土壤的水分保持能力, 还在一定程度上决定了植物群落能否在特定气候条件下维持较高的多样性。

## 4 结论

- 1) 在各土层, 红砂群落的黏粒与粉粒含量均高于梭梭群落, 而砂粒含量则低于梭梭群落。两个群落的土壤分形维数均与各自的黏粒含量变化趋势一致, 土壤分形维数可以用来表征土壤颗粒的大小和土壤质地的优劣。

- 2) 旱季红砂群落的土壤含水量在各土层均大于梭梭群落, 雨季红砂群落的土壤含水量除 0~20 cm 土层略低于梭梭群落, 其余土层均高于梭梭群落, 且相对而言, 红砂群落土壤含水量增加量整体上大于梭梭群落。

3) 两个群落的土壤含水量分布重心均深于各自的土壤黏粒含量分布重心,但都集中在20~40 cm土层,其中红砂群落的土壤黏粒含量重心和含水量重心较梭梭群落更集中,且更集中于浅土层,特别是在干旱季节能更好地保持水分,有利于早春浅根性植物的生长及生态系统的稳定性。

4) 红砂群落的物种多样性指数及科属种数量均高于梭梭群落,这主要是由于红砂群落的土壤结构和水分保持能力优于梭梭群落。

## 参考文献:

- [1] 张晨, 马伟, 陈晨, 等. 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化[J]. 生物多样性, 2022, 30(1): 59–71.
- [2] 陈晨, 邵长亮, 葛炎, 等. 卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区蒙古野驴生境格局动态及其成因分析[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 2056–2066.
- [3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901–913.
- [4] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994.
- [5] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005, 30: 75–115.
- [6] Asbjornsen H, Goldsmith G R, Alvarado-Barrientos M S, et al. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review[J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 4(1/2): 3–22.
- [7] 马建国, 朱怀德, 李玉满, 等. 土壤水分影响青藏高原东部高寒草地植物群落特征及生态系统多功能性[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 1–7.
- [8] 吴洪潘, 刘冬志, 马伟, 等. 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区啮齿动物群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9511–9524.
- [9] 马生花, 谢应忠, 胡海英, 等. 荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J]. 中国水土保持, 2019(7): 61–65.
- [10] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 272–275.
- [11] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188–190.
- [12] 贾东于, 文军, 张堂堂, 等. 黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 712–720.
- [13] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081–3089.
- [14] 宛倩, 王杰, 王向涛, 等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1716–1726.
- [15] 武晶. 科尔沁沙地不同生态型植物多样性与土壤含水量的关系[J]. 辽宁林业科技, 2017(5): 1–3, 14.
- [16] 何欣月, 王宁, 刘均阳, 等. 黄土丘陵区植物群落多样性及生物量随土壤水分梯度变化特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 31–40.
- [17] Wang R Z, Wu H, Sardans J, et al. Carbon storage and plant-soil linkages among soil aggregates as affected by nitrogen enrichment and mowing management in a meadow grassland[J]. Plant and Soil, 2020, 457(1): 407–420.
- [18] 孙杰. 阿拉善沙漠植物群落物种多样性及不同尺度生态系统评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [19] 初红军, 蒋志刚, 葛炎, 等. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴和鹅喉羚种群密度和数量[J]. 生物多样性, 2009, 17(4): 414–422.
- [20] 岳建兵, 胡德夫, 彭向前, 等. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴的数量与分布[J]. 林业资源管理, 2008(5): 111–115.
- [21] 凌敏华, 韩洪宝, 吕翠美. 近59a河南省降水重心分布特征及其与站网空间分布关系[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(1): 26–34.
- [22] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545–550.
- [23] 孟婷婷. 详述土壤颗粒体积单重分形理论模型计算过程[J]. 科技与创新, 2021(2): 64–65.
- [24] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127–3136.
- [25] 朱丽平, 夏江宝, 赵自国, 等. 温度和粒径分布对贝壳砂土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 268–272, 288.
- [26] 锁才序, 费璇, 吴新卫, 等. 若尔盖沙化草甸群落特征和土壤特性的耦合关系[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(03): 536–545.
- [27] 张阳灿, 杨文权, 魏兴勇, 等. 祁连山国家公园不同类型草地植被及土壤特征研究[J]. 中国草地学报, 2024, 46(11): 23–34.
- [28] 邓羽松, 夏栋, 蔡崇法, 等. 基于分形理论模拟花岗岩崩岗剖面土壤水分特征曲线[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(2): 1–8.
- [29] 汪星, 张敬晓, 吕望, 等. 黄土丘陵区深层干化土壤对降雨入渗的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 29–38, 63.
- [30] Liu J, Bi X, Ma M, et al. Precipitation and irrigation dominate soil water leaching in cropland in Northern China[J]. Agricultural water management, 2019, 211: 165–171.
- [31] 郭振宁, 鞍建国, 孙世贤, 等. 不同放牧强度荒漠草原土壤粒径分形维数和养分特征研究[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3698–3705.
- [32] 王凤君, 许模, 段永祥, 等. 黏粒含量对土壤含水率垂向空间特异性的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 118–122.
- [33] 程小曼, 管仪庆, 张丹蓉, 等. 荒漠绿洲过渡带梭梭周边土壤水分分布研究[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(6): 58–62.
- [34] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 933–942.

- [35] 张林静. 新疆阜康荒漠植物群落物种多样性与梭梭的遗传多样性研究[D]. 西安: 西北大学, 2002.
- [36] 孙艳霞. 阿拉善高原红砂群落多样性及种群格局研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [37] 许雅娟, 邱作金, 曾新德, 等. 石羊河下游红砂群落结构特征研究[J]. 农业科技与信息, 2023(9): 82–85.
- [38] 刘秉儒, 李文金. 荒漠植物红砂(*Reaumuria soongorica*)的保育效应及其对群落物种多样性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 117–120.
- [39] 杨学亭, 樊军, 盖佳敏, 等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 878–886.
- [40] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100–107.
- [41] 高琼, 董学军, 梁宁. 基于土壤水分平衡的沙地草地最优植被覆盖率的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(1): 33–39.
- [42] Wu G L, Ren G H, Wang D, et al. Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 120–127.