

DOI: 10. 11686/cyxb2020174

http://cyxb.magtech.com.cn

王磊, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原土壤粗质化和养分减少伴随多年生群落转变为一年生群落. 草业学报, 2020, 29(11): 183-189.

Wang L, Song N P, Chen L, et al. Increase in soil coarse sand content and decrease in soil nutrient levels accompany the transformation of perennial communities to annual communities in desert grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 183-189.

## 荒漠草原土壤粗质化和养分减少伴随 多年生群落转变为一年生群落

王磊, 宋乃平, 陈林, 杨新国, 王兴\*

(西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏大学, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**为明晰荒漠草原植物群落物种空间分布对土壤环境因子的响应, 2018 年在宁夏盐池县荒漠草原区域, 沿灰钙土内部、边缘和外部生境, 基于样线法开展植被和土壤调查及采样, 采用多元回归树和冗余分析相结合, 探讨植物群落随土壤因子的空间变化特征以及不同群落特征的差异。结果表明, 沿灰钙土内部、外部和边缘生境: 1) 短花针茅+糙隐子草+披针叶黄华群落, 苦豆子+白草群落逐渐转变为猪毛蒿+猪毛菜群落。2) 土壤粗砂粒、有机碳和全磷含量是群落物种组成空间变化的主要控制因子。3) 植物群落高度、盖度和生物量呈显著降低趋势; 群落物种多样性呈先增加后减少趋势; 植物群落密度呈显著增加趋势。结论: 沿灰钙土内部、边缘和外部生境, 土壤粗颗粒含量增加, 养分含量降低, 多年生植物群落转变为一年生植物群落。相对于残存的灰钙土生境植物群落, 经历过严重沙化的生境, 多年生物种比例、植物多样性和生物量依然较低。

**关键词:**荒漠草原; 多元回归树; 分类排序; 草地恢复

### Increase in soil coarse sand content and decrease in soil nutrient levels accompany the transformation of perennial communities to annual communities in desert grassland

WANG Lei, SONG Nai-ping, CHEN Lin, YANG Xin-guo, WANG Xing\*

Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** This research studied the distribution of plant communities in response to soil environmental factors in desert steppe. We selected a soil habitat transition gradient from sierozem to sandy soil in Yanchi, Ningxia, China. Within, at the edge of, and outside of the sierozem habitat, vegetation characteristics and soil sampling were conducted using a line transect method. Based on the soil environmental factors and community species composition data, we quantitatively classified the plant communities using multivariate regression trees and redundancy analysis. Then we analyzed the differences between the different plant communities using principal component analysis. It was found that dominant species of the plant communities changed from *Stipa breviflora* + *Cleistogenes squarrosa* + *Thermopsis lanceolate* to *Sophora alopecuroides* + *Pennisetum centrasiaticum* and to *Artemisia scoparia* + *Salsola collina* across the soil gradient. Key soil factors associated with the shift of plant community species dominance included soil coarse sand, soil organic carbon and soil total phosphorus con-

收稿日期: 2020-04-14; 改回日期: 2020-06-16

基金项目: 宁夏自然科学基金(2019AAC03056)资助。

作者简介: 王磊(1983-), 男, 宁夏银川人, 副教授, 博士。E-mail: wl8999@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wx08@nxu.edu.cn

tents. Across the habitat gradient from sierozem to sandy soil, height, cover and biomass of the plant communities showed a statistically significant increase, community species abundance showed a significant decrease, and plant community diversity showed an increase and then a decrease. As soil texture became coarser and soil nutrient content decreased along the gradient, perennial plant communities were replaced by annual plant communities. Compared with the plant communities in the sierozem habitat, the proportion of perennial plant species, plant species diversity and biomass were low in sandy habitats.

**Key words:** desert steppe; multivariate regression trees; quantitative classification; restoration in grassland

荒漠草原植物群落多样性低,降水量少且年际间波动频繁,草地生态系统脆弱。20世纪末,过度的人为干扰导致荒漠草原生态系统经历了严重的沙化荒漠化。在此过程中,首先是草地原生植被的衰退和消失,其次是土壤质地的破坏和养分的流失,最终表现为以风沙活动为标志的土地退化。草地植被的恢复和建设是阻止沙化荒漠化,实现脆弱生态系统可持续发展的有效途径。近年来,随着封育禁牧、人工林建设,草方格固沙等一系列生态工程的实施,草地植被盖度、生物量得到明显恢复,草地沙化荒漠化趋势得到逆转<sup>[1-2]</sup>。然而,当前草地生产力依然处于较低水平,草地自我维持能力较弱,草地恢复可持续性依然面临挑战<sup>[3]</sup>。

特定环境(气候、土壤类型、干扰等)条件下,草地植被生产力和稳定性的维持依赖于群落物种组成特征。草地植被恢复过程中,植物群落物种组成的变化引起生态系统属性的连锁反应,其中包括群落多样性、盖度、生物量等<sup>[4]</sup>。群落结构组成的多样化,尤其是多年生优势种比例较高的群落,在维持干旱和半干旱草地生态系统生产力和稳定性方面发挥重要作用,这种作用途径机制主要表现为群落中优势植物种和功能群之间的互补效应,某一物种消失时另一物种的补偿效应等<sup>[5-6]</sup>。然而,当前荒漠化逆转的背景下,中国北方草地群落多年生物种的比例依然较低<sup>[5-6]</sup>,尤其是荒漠草原区域草地植被的恢复更多地表现为植被覆盖度的提高,而原生的多年生优势植物短花针茅(*Stipa breviflora*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)等逐渐在植被中退出,取而代之的是猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)等一年生植物种<sup>[7]</sup>。上述植物群落量、质恢复之间的矛盾使得当前的草地植被恢复处于一种僵持状态,此状态可以描述为草地多年生和一年生植物群落在空间上镶嵌分布且长期稳定共存的格局。因此,深入理解当前植物群落物种组成在空间上的间断性分布特征及其影响因素,可为进一步的草地质量的恢复提供理论指导。

荒漠草原经历过长期不合理的人为开垦和过度放牧干扰,其原生硬质灰钙土生境遭受了严重的破碎化,被分割为空间上相互独立的斑块单元<sup>[8]</sup>。长期持续的干扰引起这些斑块中的原生植被破坏,同时形成了新的边缘生境。这些新的边缘生境较低的植被覆盖增加了土壤风蚀侵蚀风险,并最终导致沙化荒漠化的发生<sup>[9]</sup>。沙化荒漠化的本质变化表现为土壤物理和化学属性的变化,尤其是土壤细颗粒物通过风蚀侵蚀作用后不断的流失。长期的风蚀侵蚀导致土壤砂粒沿着下风向迁移和堆积,并最终形成了大面积的沙化生境。最终,原生残存的硬质灰钙土斑块散布于广阔沙化生境中,沿原生灰钙土生境内部、边缘、外部,土壤质地和植物群落类型均发生显著的变化<sup>[10]</sup>。由于荒漠草原植物群落在空间上的镶嵌分布格局主要受到环境过滤生态过程调控,其中土壤质地的改变决定了植物群落物种组成在空间上间断性分布特征<sup>[7]</sup>。因此,原生灰钙土生境内部、边缘、外部连续的生物和非生物变化梯度,为理解当前荒漠草原植物群落物种组成在空间上的间断性分布特征及其影响因素提供理想实验样地。同时,植物群落物种空间分布格局对环境因子的响应,可通过植物群落数量分类和排序方法进行详细真实地刻画<sup>[9]</sup>。因此,本研究围绕荒漠草原原生灰钙土生境内部、边缘、外部连续生境变化梯度,开展植物群落数量分类和排序研究,揭示荒漠草原斑块镶嵌植被格局的群落类型、结构以及物种与环境之间的关系,为荒漠草原荒漠化逆转过程中的植被恢复与重建、多样性保护等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县(37°04'—38°10' N, 106°30'—107°41' E),该区域北与毛乌素沙地相连,南接黄土高原。气候属典型的中温带大陆性气候,年均气温 8.1 °C,无霜期 120 d,年降水量 250~350 mm,主要集中在 7—9

月,占全年降水量的 60%以上,年平均蒸发量 2710 mm。土壤类型以灰钙土为主,其次是黑垆土和风沙土<sup>[10]</sup>。荒漠草原典型建群种短花针茅群落呈散落的斑块化小面积分布,退化严重<sup>[10]</sup>。主要草本植物有猪毛蒿、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、冰草、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、山苦荬(*Ixeris denticulata*)、牛枝子、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等<sup>[10]</sup>。

## 1.2 样品采集

2018 年 8 月在宁夏盐池县荒漠草原草地选择一个灰钙土向沙土过渡区为研究对象,采用样线法进行植被调查和土壤采样:沿灰钙土内部、边缘、外部连续变化生境,分别设置 3 条 50 m 长间隔 15 m 的平行样线,在每条样线上每间隔 2 m 设置一个 1 m×1 m 的样方,共设置调查样方 75 个(图 1)。每个样方内部,植被调查项目:物种的数量、高度、盖度,然后齐地面收集样方内所有植物地上部分,在实验室用 75 °C 烘干至恒重测其干重<sup>[11]</sup>。每个样方内部,土壤调查采样:按照 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 分层采集土样,相同样方同一土层的 3 个土样混合,在实验室采用烘干法测定土壤含水量(105 °C 烘干至恒重)<sup>[5]</sup>。采用元素分析仪(Vario Macro Cube 德国)测定土壤有机碳、全氮和土壤全磷,采用马尔文激光粒度仪(Malvern 3000 英国)测定土壤颗粒组成:黏粒(clay, <0.002 mm),粉粒(silt, 0.002~0.05 mm),细砂粒(fine sand, 0.05~0.1 mm),粗砂粒(coarse sand, 0.1~2 mm)<sup>[7]</sup>。

## 1.3 植物群落多样性

基于植物群落物种高度、盖度、密度等调查数据,计算物种重要值,丰富度(S),香农威纳指数(Shannon-Wiener),均匀度指数(Pielou)。各指数计算公式如下<sup>[11]</sup>:

$$\text{种的重要值}(P_i) = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度}) / 3$$

$$\text{物种丰富度}: S = \text{出现在样方内的物种数}$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}: H = \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i (i=1, 2, 3, \dots, s)$$

$$\text{均匀度指数}: J = H / \ln S$$

## 1.4 数据处理与分析

根据数量生态学数据整理原则:剔除出现在 95%以上样方中的植物种(极端多种)和出现在 5%以下的样方中的植物种(极端少种),以植物种重要值作为分类排序依据<sup>[12]</sup>。采用冗余分析和多元回归树相结合的方法分别对不同植物群落分类和命名。首先,以测定的土壤物理和化学属性为自变量,以 75 个样方中调查物种的重要值为因变量,开展多元回归树(multivariate regression trees, MRT)分析。其次,采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)对上述土壤和数据进行分析,此分析过程中应用前向选择确定影响植物物种组成变化的主要土壤环境因子,并进行蒙特卡罗检验(Monte Carlo permutation test)( $P < 0.05$ )。多元回归树分析基于 R 语言和 mvpart 函数包进行,冗余分析基于 R 语言 vegan 函数包进行<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物群落分类和命名

基于 1-SE 规则,在保证通过交叉验证得到的预测误差最小前提下(最小误差±一个相应标准误范围),以土壤粗砂粒、黏粉粒含量作为划分节点(图 2A),最终将植物群落划分为 3 组(c 点值)(图 2B)。基于多元回归树

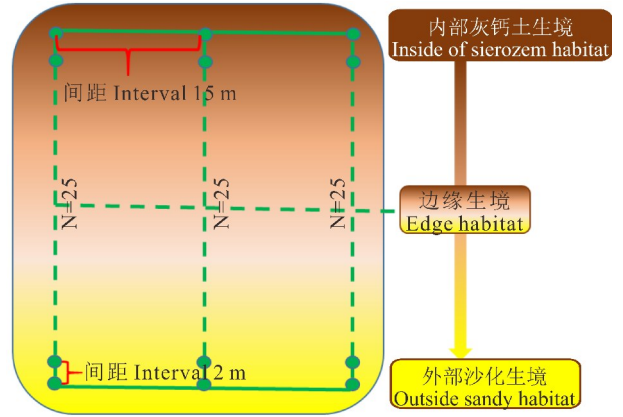


图 1 实验设计及采样示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the sampling

图中 N 代表样方数量,绿色圆代表样方。N indicates the number of sample, green circle represents the square.

划分结果,进一步采用冗余分析探讨 3 组植物群落物种组成变化及其对土壤环境因子的响应,结果表明:土壤有机碳、全磷、粗砂粒和黏粉粒是群落物种组成空间分布的主要调控因素,土壤粗砂粒和黏粉粒与植物群落的优势种相关性最高,是影响植物群落分布的首要控制因素(图 3 和表 1)。植物群落第一组为猪毛蒿+猪毛菜(*Salsola collina*)群落,主要分布在土壤粗砂粒含量大于 32.95%生境中,第二组为短花针茅+糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)+披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)群落,主要分布在黏粉粒含量大于 43.84%生境中,第三组为苦豆子+白草群落,主要分布于黏粉粒含量小于 43.84%生境中(图 2A)。

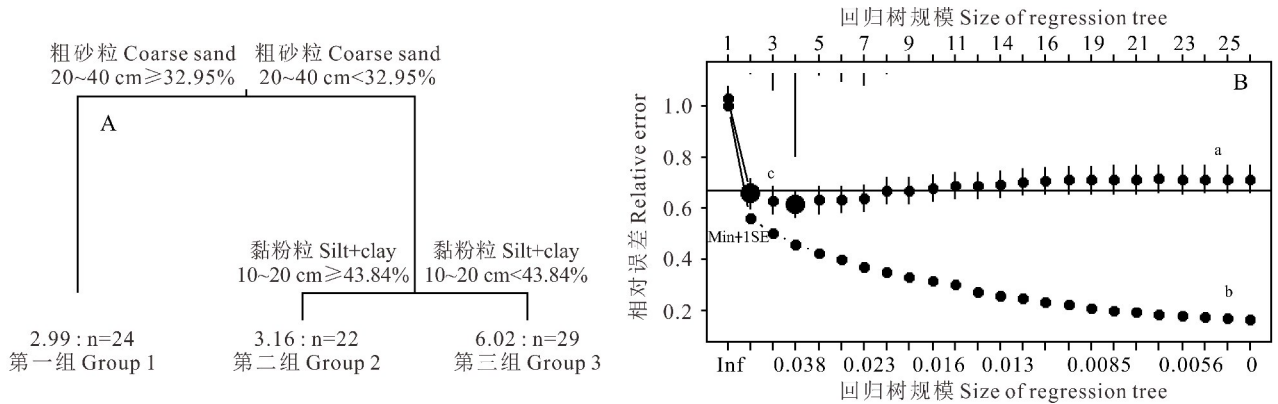


图 2 植物群落分类多元回归树(A)及分类相对误差和交叉验证相对误差(B)变化

Fig. 2 Multivariate regression tree for plant community (A) and resubstitution and cross-validation relative error (B) for the multivariate regression tree

(a) 交叉验证相对误差变化趋势; (b) 相对误差变化趋势; (c) 基于“1-SE”规则确定的分类属规模点; Min+1SE: 交叉验证相对误差最小值加上一个标准误差线。(a) Change trend of cross-validated relative error; (b) Change trend of relative error; (c) The tree size suggested by “1-SE”; Min+1SE: One standard error above the minimum cross-validated relative error.

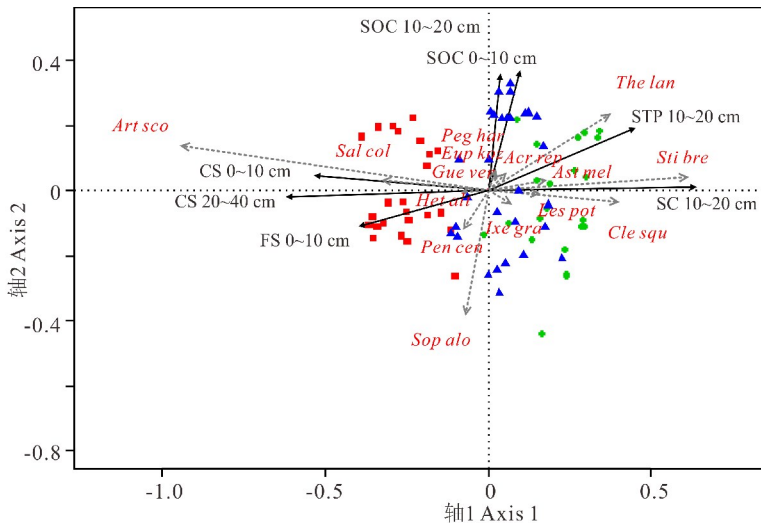


图 3 不同植物群落物种组成变化与环境因子关系

Fig. 3 Relationship between different plant community species composition and soil environmental factors

不同形状和颜色代表多元回归树划分的 3 组群落: 第 1 组为红色方框; 第 2 组为绿色圆点; 第 3 组为蓝色三角, 下同。Different shapes and colors represent three groups of communities divided by multiple regression trees: The first group is a red box; The second group is a green dot; The third group is a blue triangle. The same below. SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; STP: 土壤全磷 Soil total phosphorous; CS: 土壤粗砂粒 Soil coarse sand; SC: 土壤黏粉粒 Soil silt clay; *Sti bre*: 短花针茅 *S. breviflora*; *Clei squ*: 糙隐子草 *C. squarrosa*; *Les pot*: 牛枝子 *L. potaninii*; *Gue ver*: 米口袋 *Gueldenstaedtia verna*; *Art sco*: 猪毛蒿 *A. scoparia*; *Sal col*: 猪毛菜 *S. collina*; *Pol ten*: 远志 *Polygala tenuifolia*; *Eup koz*: 沙生大戟 *Euphorbia pekinensis*; *Peg har*: 骆驼蓬 *Peganum harmala*; *Ixe gra*: 细叶山苦荬 *Ixeridium chinense*; *The lan*: 披针叶黄华 *T. lanceolata*; *Pen cen*: 白草 *P. centrasiaticum*; *Sop alo*: 苦豆子 *S. alopecuroides*; *Ast mel*: 草木樨状黄耆 *A. melilotoides*; *Het alt*: 阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*; *Acr rep*: 顶羽菊 *Acroptilon repens*.

表 1 基于前向选择分析的影响植物群落物种组成的土壤环境因子筛选

Table 1 Soil environmental factors significantly impacted distribution of species composition based on forward selection

变量 Variables	解释量 $R^2$ Explanation	累计 $R^2$ 解释量 Cumulative explanation	解释量校正值 Adjusted explanation	F	P
黏粉粒 Silt+clay 10~20 cm	0.459	0.459	0.451	61.835	0.000
粗砂粒 Coarse sand 0~10 cm	0.047	0.506	0.492	6.924	0.000
全磷 Total phosphorus 10~20 cm	0.020	0.527	0.507	3.064	0.003
粗砂粒 Coarse sand 20~40 cm	0.021	0.548	0.522	3.322	0.002
细砂粒 Fine sand 0~10 cm	0.021	0.569	0.537	3.315	0.002
有机碳 Soil organic carbon 10~20 cm	0.014	0.583	0.546	2.271	0.026
有机碳 Soil organic carbon 0~10 cm	0.012	0.594	0.552	1.960	0.048

2.2 不同植物群落特征差异

PCA 分析可反映植物群落特征 79.83% 的变化(图 4)。PCA 第 1 轴主要反映了植物高度、盖度和生物量的显著变化趋势;第 2 和 3 轴反映了植物群落密度、丰富度、香农威纳指数和均匀度指数的显著变化趋势;第 4 轴主要代表了植物高度、丰富度和香农威纳指数的显著变化趋势(表 2)。整体而言,随着多年生植物群落向一年生植物群落转变(图 3):植物群落多样性表现为先增加后降低趋势,苦豆子+白草植物群落多样性较高;植物群落高度、密度、生物量呈现显著降低趋势,短花针茅+糙隐子草+披针叶黄华群落具有较高的高度、生物量和盖度;猪毛蒿+猪毛菜群落具有较高的密度(图 4)。

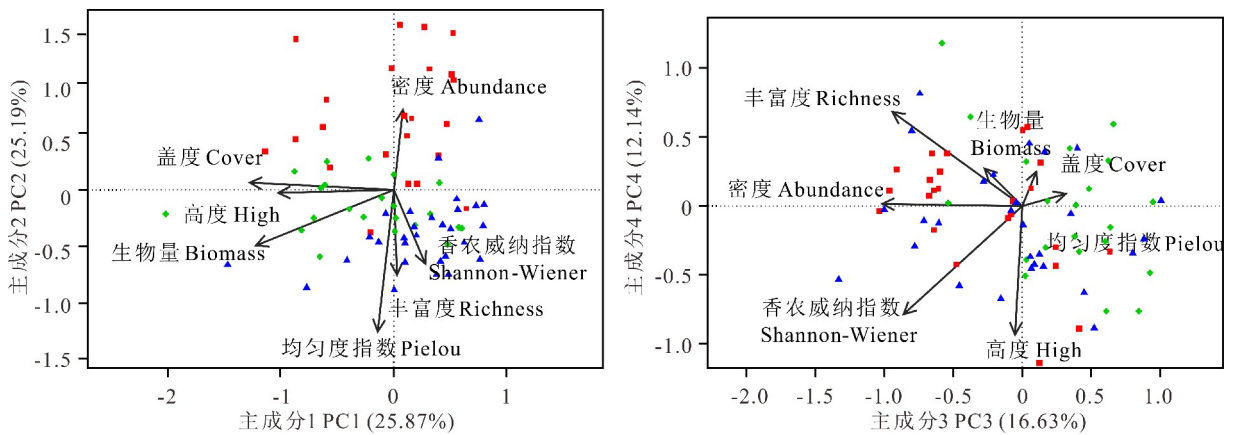


图 4 不同植物群落特征差异

Fig. 4 Change trend for different plant community characteristic

表 2 植物群落特征参数与 PCA 典范轴的相关系数及显著水平

Table 2 Correlation coefficient between community characteristic and axis of PCA

指标 Index	相关性系数 Correlation parameter				P 值 P-value			
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
高度 High	-0.686	-0.018	-0.034	-0.631	0.000	0.878	0.771	0.000
盖度 Cover	-0.858	0.045	0.070	0.166	0.000	0.702	0.549	0.154
生物量 Biomass	-0.823	-0.332	-0.183	0.181	0.000	0.004	0.117	0.119
密度 Abundance	0.058	0.481	-0.686	0.008	0.620	0.000	0.000	0.948
丰富度 Richness	0.022	-0.508	-0.636	0.460	0.854	0.000	0.000	0.000
香农威纳指数 Shannon-Wiener	0.187	-0.441	-0.579	-0.531	0.108	0.000	0.000	0.000
均匀度指数 Pielou	-0.093	-0.849	0.215	0.059	0.427	0.000	0.065	0.614

### 3 讨论

荒漠草原草地植物群落呈现斑块镶嵌的空间分布格局<sup>[14]</sup>。本研究结果表明:沿灰钙土斑块内部、边缘、外部,随着土壤沙化程度的增加,多年生植物群落转变为一年生植物群落。土壤水分是该区域植被空间镶嵌分布格局的驱动力,决定了植被空间分布格局与生态过程,而不同土壤质地往往与土壤水文过程密切相关<sup>[10]</sup>。短花针茅群落作为荒漠草原原始地带性植被类型,主要保存于未沙化或轻度沙化的灰钙土生境中,此类生境土壤质地坚硬,紧实的沙壤土黏粉粒含量高,降水后土壤水分不易入渗,但是能够保持水分,更适宜于短花针茅、糙隐子草等具有细而多分枝的多年生耐旱植物生存,这些物种在小范围土体中具有很高的根系密度,适宜于容纳充足水分的沙壤土<sup>[15-18]</sup>。与灰钙土内部生境不同,粗砂粒含量较高的外部生境降水入渗快,渗漏快,发育了能够适应土壤水分冲击式波动,且种群密度在降水丰富时期呈暴发式增长的猪毛蒿、猪毛菜和蒙古虫实等一年生植物<sup>[10,16]</sup>。这些植物属于典型的  $r$  对策种,在大降水事件时集中暴发,成为沙化生境中的优势种植物。同时,优势种苦豆子根系分布较深,也能充分利用沙化生境深层土壤水分,因此成为沙化生境中的优势物种之一。因此,本研究多元回归树中,土壤黏粉粒含量与优势种短花针茅、糙隐子草等多年生植物显著正相关,而粗砂粒含量与猪毛蒿、苦豆子的空间分布显著正相关(图 2)。

土壤养分含量对于荒漠草原多年生植物种在群落中的维持具有重要作用,例如,荒漠化过程中,土壤养分含量较高的细颗粒物质的损失,导致多年生植物被一年生植物替代<sup>[7,16]</sup>。本研究植物群落物种组成与土壤因子的冗余分析结果表明:土壤有机碳、全磷与土壤粗砂粒含量负相关,共同决定了多年生优势种短花针茅、苦豆子以及一年生猪毛蒿等植物的空间变化(图 3)。已有研究表明,荒漠草原土壤颗粒组成影响土壤养分和水分的空间分布,对植物群落物种组成的空间变化起到间接调控作用。因此,进一步的研究需要探索土壤物理和化学因素对植物群落物种空间分布的单独影响。总之,在植物群落排序分类的研究中,多元回归树和冗余分析的结合能够更加真实和充分地反映植物群落空间分布与土壤环境变化的协同作用。就荒漠草原草地植物群落分类而言,土壤细颗粒物质和土壤养分含量较高的灰钙土生境有利于原生禾本科短花针茅群落的维持,土壤粗制化且贫瘠的外部沙化生境更有利于一年生猪毛蒿群落的维持和发展。

荒漠草原原生植物个体在群落中所占的比例,对于维持草地生产力和稳定性具有重要作用<sup>[3]</sup>。本研究中,短花针茅群落具有较高的高度、盖度和生物量,但群落多样性在轻度沙化的苦豆子群落中维持较高水平(图 4)。多样性与生物量之间并未呈现很好的正相关关系,这说明群落整体生物量依赖于群落优势种短花针茅。从植物群落空间分布特征看,苦豆子群落属于短花针茅群落向猪毛蒿群落转变的过渡性群落,多年生和一年生群落交错区域,较高的多样性可能与土壤生境较高的异质性有关,因为较高的土壤生境异质性可以维持具有不同生态位的物种长期稳定共存。猪毛蒿群落具有较高的密度,这主要是一年生猪毛蒿通过产生大量的种子和个体来维持种群的发展。从当前植物群落特征来看,封育禁牧政策实施近 20 年以来,荒漠草原草地原生植物群落在空间上的分布依然受到限制,主要集中在灰钙土生境中。虽然多年生豆科植物在轻度沙化生境下占据主导地位,具有较高的多样性,但群落生物量、盖度依然低于原生的短花针茅群落。多年生植物种在群落中的比例依然较低,尤其是经历过严重沙化的生境条件下,植物群落依然以一年生菊科植物为优势种。未来草地恢复焦点集中在如何提高草地原生种短花针茅、牛枝子等在沙化生境中的比例方面。

### 4 结论

当前荒漠草原荒漠化逆转背景下,生境土壤物理和化学性状同时决定了群落物种组成的空间分布。随着土壤沙化程度的增加和养分含量的降低,多年生植物群落逐渐转变为一年生植物群落。黏粉粒含量较高的灰钙土生境保留较多的原生物种成分,以多年生禾本科物种占据优势地位,该群落具有较高的植被盖度和生物量。经历过轻度沙化的灰钙土斑块边缘生境,多年生豆科植物占据优势,植被群落具有较高多样性水平。经历过严重沙化的灰钙土外部生境,一年生菊科植物为优势种,该群落具有较高的密度。未来可持续性的荒漠化逆转过程中,植被恢复需要充分考虑土壤生境类型,制定更加精细化的植被恢复管理措施。

## 参考文献 References:

- [1] Song N P, Du L T, Wang L. Vegetation dynamics over 2000–2012 and its driving factors in Yanchi County, Ningxia Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7377–7386.  
宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000–2012 年植被变化及其驱动力. *生态学报*, 2015, 35(22): 7377–7386.
- [2] Qiu K, Xie Y, Xu D, *et al.* Ecosystem functions including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for vegetation recovery. *Science Reports*, 2018, 8(7607): 1–11.
- [3] Pan Q M, Xue J G, Tao J, *et al.* Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1642–1650.  
潘庆民, 薛建国, 陶金, 等. 中国北方草原退化现状与恢复技术. *科学通报*, 2018, 63(17): 1642–1650.
- [4] Tabarelli M, Carlos A, Peresb C, *et al.* The ‘few winners and many losers’ paradigm revisited: Emerging prospects for tropical forest biodiversity. *Biological Conservation*, 2012, 155(3): 136–140.
- [5] Bai Y F, Han X, Wu J, *et al.* Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181–184.
- [6] Liu Y, Pan Q, Liu H, *et al.* Plant responses following grazing removal at different stocking rates in an Inner Mongolia grassland ecosystem. *Plant and Soil*, 2011, 340(2): 199–213.
- [7] Tang Z S, Deng L, Shangguan Z P, *et al.* Desertification and nitrogen addition cause species homogenization in a desert steppe ecosystem. *Ecological Engineer*, 2019, 138(4): 54–60.
- [8] Allington G R H, Valone T J. Reversal of desertification: The role of physical and chemical soil properties. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(3): 973–977.
- [9] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft mountains, Namibia. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12(1): 53–60.
- [10] Song N P, Wang X, Chen L, *et al.* Co-existence mechanisms of plant species within “soil islands” habitat of desert steppe. *Biodiversity Science*, 2018, 26(7): 667–677.  
宋乃平, 王兴, 陈林, 等. 荒漠草原“土岛”生境群落物种共存机制. *生物多样性*, 2018, 26(7): 667–677.
- [11] Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548.  
方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533–548.
- [12] Zhang J T. *Quantitative ecology (The 2nd edition)*. Beijing: Science Press, 2004.  
张金屯. *数量生态学(第 2 版)*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] Roberts D W. R package version 1.2-2. Laboratory for Dynamic Synthetic Vegetation Phenomenology, 2006. [2020-07-28]. <http://cran.r-project.org/>.
- [14] Du Y X, Fan J, Li S Y, *et al.* Fractal dimension characteristics of soil particle size distribution under different vegetation patches in desert steppe and its relationship with soil nutrients. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3716–3724.  
杜雅仙, 樊瑾, 李诗瑶, 等. 荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3716–3724.
- [15] Walter H. *Vegetation of the earth and ecological systems of the geo-biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [16] Liu B, Zhao W Z, Liu Z L, *et al.* Changes in species diversity, aboveground biomass, and vegetation cover along an afforestation successional gradient in a semiarid desert steppe of China. *Ecological Engineering*, 2015, 81(4): 301–311.
- [17] Zuo X A, Yue X Y, Lü P, *et al.* Contrasting effects of plant inter- and intraspecific variation on community trait responses to restoration of a sandy grassland ecosystem. *Ecology and Evolution*, 2016, 7(3): 1125–1134.
- [18] Tang Z, Hui A, Zhu G, *et al.* Beta diversity diminishes in a chronosequence of desertification in a desert steppe. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 543–550.