

DOI: 10.20103/j.stxb.202502040234

龚昕, 许冬梅, 妥海东, 魏浩男, 雷永华, 周瑶, 李雯, 王国会, 沈艳, 马红彬. 不同乡土草种补播对荒漠草原植物群落特征和种群生态位的影响. 生态学报, 2025, 45(17): 8389-8404.

Gong X, Xu D M, Tuo H D, Wei H N, Lei Y H, Zhou Y, Li W, Wang G H, Shen Y, Ma H B. Effects of reseeding different native grasses on plant community characteristics and population niche in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 8389-8404.

不同乡土草种补播对荒漠草原植物群落特征和种群生态位的影响

龚 昕^{1,2}, 许冬梅^{1,2}, 妥海东³, 魏浩男⁵, 雷永华⁴, 周 瑶^{1,2}, 李 雯^{1,2}, 王国会^{1,2}, 沈 艳^{1,2}, 马红彬^{1,2,*}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学盐池北部荒漠草原野外科学观测研究站, 吴忠 751500

3 海原县国有林场和草原建设服务中心, 中卫 755200

4 海原县乡村振兴服务中心, 中卫 755200

5 中宁县林业和草原局, 中卫 755199

摘要:开展补播对退化草原物群落特征和种群生态位影响研究对草地生态建设具有重要意义。在宁夏退化荒漠草原, 以封育为对照(CK), 选取沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、牛枝子(*Lepedeza pataninii*)、沙打旺(*Astragalus laxmannii*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)为补播草种, 以禾本科与豆科物种总比例(种子重量比例)2:1 设置 6 种乡土草种补播组合, 对补播多年后荒漠草原植物群落特征和种群生态位进行了研究。结果表明: (1) 各草种组合补播后植物数量特征较天然封育草地(CK)均有提升; 物种多样性指数除 Pielou 均匀度指数外, 天然草地 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数均高于补播处理草地。 (2) 除蒙古冰草+沙打旺的组合外, 其余草种组合物种生态位宽度 2 以上的物种数占本处理总物种数比例均达到 50% 以上; 不同草种组合补播下, 各处理样地物种间资源竞争激烈, 但生态位重叠明显($Q_{ik} \geq 0.5$)的种对比例相较于天然草地均有不同程度的降低。 (3) 不同草种组合补播后总体联结性不尽相同, 其中沙生冰草+蒙古冰草+牛枝子组合呈显著负联结, 沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪组合呈显著正联结; 各草种组合中呈显著负联结的种对数均高于呈现显著正联结的种对数。 (4) 土壤速效磷、土壤全氮含量及土壤 pH 值通过直接或间接途径驱动植物群落结构和生态位分化, 其空间异质性通过资源分配和种间竞争塑造了多样性格局。研究认为, 综合植物群落特征、生态位及种间关系, 沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪是研究区退化荒漠草原最佳补播草种组合。

关键词:补播; 群落特征; 生态位宽度; 生态位重叠; 种间联结性

Effects of reseeding different native grasses on plant community characteristics and population niche in desert steppe

GONG Xin^{1,2}, XU Dongmei^{1,2}, TUO Haidong³, WEI Haonan⁵, LEI Yonghua⁴, ZHOU Yao^{1,2}, LI Wen^{1,2}, WANG Guohui^{1,2}, SHEN Yan^{1,2}, MA Hongbin^{1,2,*}

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Ningxia University Yanchi North Desert Grassland Field Scientific Observation and Research Station, Wuzhong 751500, China

3 Haiyuan County State-owned Forest Farm and Grassland Construction Service Center, Zhongwei 755200, China

4 Haiyuan County Rural Revitalization Service Center, Zhongwei 755200, China

基金项目:国家自然科学基金项目(32371783); 中央引导地方科技发展专项项目(2024FRD05059); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC05020); 海原县天然草原刈割效应和改良效应监测评价项目(2024)

收稿日期:2025-02-04; **采用日期:**2025-06-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ma_hb@nxu.edu.cn

5 Zhongning County Forestry and Grassland Bureau, Zhongwei 755199, China

Abstract: Understanding the effects of reseeded on degraded grassland community characteristics and population niche dynamics holds critical importance for grassland ecological restoration. In degraded desert grasslands of Ningxia, using enclosure grassland as the control (CK), we selected *Agropyron desertorum*, *Agropyron mongolicum*, *Lespedeza pataninii*, *Astagalus laxmannii*, and *Astragalus melilotoides* as reseeded species. Six combinations of native grass species were established for reseeded at a total Poaceae-to-Fabaceae seed weight ratio of 2:1. We investigated the plant community characteristics and population niches in the desert grassland several years after reseeded. Through comprehensive analysis of plant community characteristics and niche dynamics six years post-reseeded, we found: 1) All reseeded combinations exhibited enhanced quantitative vegetation characteristics compared to CK, although CK maintained superior species diversity indices (Margalef richness, Shannon-Wiener diversity, and Simpson dominance indices) except for Pielou evenness. 2) Niche width values exceeding 2 were observed in >50% of species across all combinations except *A. mongolicum*+*A. laxmannii*. Despite prevalent interspecific resource competition, treatments showed reduced proportions of species pairs with significant niche overlap ($Q_{ik} \geq 0.5$) relative to naturally enclosed grassland. 3) Interspecific association patterns varied substantially among combinations. The *A. desertorum* + *A. mongolicum* + *A. melilotoides* combination demonstrated predominantly positive associations, whereas *A. desertorum*+*A. mongolicum*+*L. potaninii* showed primarily negative associations. All combinations contained more negatively associated species pairs than positive ones. 4) Structural equation modeling revealed that soil available phosphorus, total nitrogen, and pH drove community structure and niche differentiation through both direct and indirect pathways. Spatial heterogeneity mediated diversity patterns via resource partitioning and competitive interactions. Based on integrated assessment of community characteristics, niche dynamics, and species interactions, we recommend *A. desertorum*+*A. mongolicum*+*A. melilotoides* as the optimal reseeded combination for restoring degraded desert steppe ecosystems in the study region.

Key Words: reseeded; community characteristics; niche width; niche overlap; interspecific association

草原是地球上最大的陆地生态系统类型,约占陆地总面积的 40%^[1],对维系全球生态系统可持续发展具有重要意义,但是由于长期不合理利用致使草地退化严重。补播是一种在退化草地中普遍实施的人工生态恢复措施,旨在通过种植新的植物来改善草地的生产力和生态功能。植物群落特征是指植物群落在特定环境条件下所表现出的结构、组成和功能特性,在退化生态系统恢复过程中,植物群落通过物种间的竞争、协同与功能互补形成的自发机制,是其实现稳定恢复的关键生态学基础^[2-3]。物种多样性反应群落结构的复杂程度^[4],生态位表征资源的利用策略^[5-6],种间联结揭示物种间的互作网络^[7],三者结合可以综合评估退化草地群落植被的修复效果。

目前已有不少草地补播相关研究。在青藏高原的高寒草甸中,补播后的地上生物量是不补播的 1.31—1.44 倍,物种数和丰富度指数也显著增加^[8];在中度退化高寒草地中,补播后植被盖度、地上、地下生物量均显著上升^[9]。干旱半干旱区荒漠草原补播后草地植物物种数增加,豆科和一年生草本比例增加,多年生草本和半灌木比例减少^[10]。除此之外,补播可以改变植物的生态位宽度和重叠情况。在新疆伊犁荒漠草原的研究中^[11],补播杂交苜蓿后,针茅 (*Stipa* sp.) 的生态位宽度显著增加至 0.798,而伊犁绢蒿 (*Seriphidium transiliense*) 的生态位宽度在对照、禁牧和补播条件下分别为 1.037、1.101 和 1.070。火久艳等^[12]在高寒草地的研究发现,补播显著增加了植物群落的生态位宽度和生态位重叠度,这可能是由于补播增加了植物种类数量,从而增强了植物间的竞争;同样的,巴里坤的研究发现,通过激烈的种间竞争,补播草地群落种间结构相对合理、群落结构日趋稳定^[13]。可见,补播对一些物种的生态位宽度有显著影响,但这种影响因立地条件和物种而异,补播物种不同会使物种生态位和种间关系发生变化。然而,作为退化草原生态修复的一种普遍方式^[14],补播草种一般需要严格的试验筛选,选取适合退化草地所在区域的草种,以减少物种间的竞争,增强补

播后草地植物的群落的稳定性。近年来,越来越多研究发现乡土草种以其抗旱耐寒、适应性强的特点,对退化草地修复效果良好。李永康等^[15]利用蒙古冰草+牛枝子和蒙古冰草+草木樨状黄芪这两种乡土草种补播模式提高了退化荒漠草原的植被盖度、高度、地上生物量和群落密度。在“黑土滩”型高寒退化草地,补播垂穗披碱草(*Elymus nutans*) + 中华羊茅(*Festuca sinensis*) + 冷地早熟禾(*Poa crymophila* Keng)、垂穗披碱草+燕麦(*Avena sativa* L.) + 中华羊茅+冷地早熟禾两种乡土草种组合,可显著提高植被盖度、草群高度和地上生物量,且毒杂草生长繁殖受到明显抑制^[16]。

作为旱生性较强的草原类型,荒漠草原生态系统脆弱、稳定性较差,对自然条件的变化及人类活动的干扰敏感,更易发生草地生态系统退化^[17]。尽管有关退化荒漠草原补播研究已有不少报道^[10],乡土植物补播草种组合研究亦有一定研究^[15],但有关不同草种补播后荒漠草原植物群落特征和种群生态位变化报道较少,补播后群落生态位和种间关系发生了何种变化不清晰。基于此,本研究以宁夏盐池退化荒漠草原为对象,通过设置 6 种乡土植物草种组合,重点解决以下科学问题:①不同草种组合补播如何通过种间互作影响荒漠草原植物物种多样性变化?②补播引入的物种与原生种生态位的资源利用策略是互补还是竞争?受哪些土壤环境因子影响?研究通过探讨补播后植物群落特征、物种生态位和种间关联性变化,为深入了解乡土植物补播修复下荒漠草原生态系统的结构和功能变化提供基础,为宁夏及周边干旱区退化荒漠草原修复的草种配置提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于宁夏盐池县宁夏大学四墩子荒漠草原野外科学观测研究站(37°04'—38°10'N, 106°30'—107°41'E)。全年气候干旱,属于典型的大陆型气候,年均温 9.4℃,年无霜期约为 167 d,年平均降水量 289 mm,蒸发量约为 2890 mm。地带性土壤为灰钙土,质地为沙壤土。地带性植被为荒漠草原,分布的主要植物有短花针茅(*Stipa breviflora*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、西伯利亚远志(*Polygala sibirica*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)等。

1.2 试验设置

本试验中,为了使补播后草群物种比例和组成最大可能接近当地未退化草地(近自然化),补播物种比例主要参考研究区未退化荒漠草原群落中禾本科和豆科比例,草种选择主要为未退化荒漠草原中分布的饲用价值较好牧草,播种量主要参考未退化草地植物密度确定。因此,试验以天然封育草地为对照(CK),选取沙生冰草、蒙古冰草、牛枝子、沙打旺、草木樨状黄芪为补播草种,以禾本科与豆科物种总比例(种子重量比例)为 2:1,设置 33.33%沙生冰草+33.33%蒙古冰草+33.33%牛枝子(SMN)、33.33%沙生冰草+33.33%蒙古冰草+33.33%沙打旺(SMS)、33.33%沙生冰草+33.33%蒙古冰草+33.33%草木樨状黄芪(SMC)、66.67%蒙古冰草+33.33%牛枝子(MN)、66.67%蒙古冰草+33.33%沙打旺(MS)、66.67%蒙古冰草+33.33%草木樨状黄芪(MC)6 个草种组合试验,共 7 个处理。以上每个处理重复 3 次,每个处理小区面积为 100 m²,小区间距 2 m。

补播试验于 2018 年 8 月设置,补播方式为提前隔带翻耕后雨后补播。于 2018 年 6 月进行隔带翻耕(翻耕带宽 4 m,带间距 6 m),8 月上旬雨后天在翻耕带上采用机械条播,播深 2—3 cm,行距 20 cm,播后耢平镇压。播种量除考虑未退化草地植物密度外,同时结合各物种播前发芽率(沙生冰草、蒙古冰草、牛枝子、草木樨状黄芪和沙打旺发芽率分别为 68%、85%、95%、52%和 55%)及以往补播经验,确定各物种实际播种量。播种后任由种子自然萌发和生长,不进行水肥等人为管理措施。各处理草种组合、各草种实际播种量等情况见表 1。

1.3 调查和取样

播种后第 5 年,即 2023 年植被生长旺盛期(8 月),在试验区对不同草种组合下的处理样地进行植被调查,在各处理样地采用五点采样法中选取 5 个 1 m × 1 m 的样方,记录样方内植物种类、分种观测物种高度、盖度、密度和频度,并将样方内植物分种齐地刈割装入信封用于生物量的测定。在补播草种组合植被调查各

样方附近,在每个样地采用 5 点取样法用土钻采集 0—40 cm 土壤样品(10 cm 为一层)^[18]。土壤样品带回实验室处理后,测定相关养分含量。其中土壤有机质、全氮、全磷含量分别采用重铬酸钾外加热法、全自动凯氏定氮仪(K-360,瑞士)、HClO₄-H₂SO₄消煮-钼锑抗比色法测定^[19];土壤容重用环刀取原状土带回实验室于105 ℃烘箱内烘至恒重即为土壤容重;土壤含水量用水分温度监测仪长期监测^[20]。测定的土壤性状如表 2 所示。

表 1 补播草种组合处理
Table 1 Reseeding grass combination treatment

处理 Different treatments	代号 Code name	草种组合 Seed combination	草种播种量/(kg/hm ²) Grass seeding rate
封育 Enclosure	CK	天然禁牧封育草地	0
草种组合 Grass combinations	SMN	33.33%沙生冰草 + 33.33%蒙古冰草+33.33%牛枝子	7.5+7.5+7.5
	SMS	33.33%沙生冰草 + 33.33%蒙古冰草+33.33%沙打旺	7.5+7.5+7.5
	SMC	33.33%沙生冰草+33.33%蒙古冰草+33.33%草木樨状黄芪	7.5+7.5+7.5
	MN	66.67%蒙古冰草+33.33%牛枝子	15.0+7.5
	MS	66.67%蒙古冰草+33.33%沙打旺	15.0+7.5
	MC	66.67%蒙古冰草+33.33%草木樨状黄芪	15.0+7.5

表中草种播种量为理论播种量,实际播种量根据未退化草地植物密度、不同物种发芽率及以往补播经验确定;CK、SMN、SMS、SMC、MN、MS、MC 分别代表不同草种组合处理

表 2 各草种组合土壤理化特征
Table 2 Soil physical and chemical characteristics of each grass combination treatment

土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	草种组合 Grass combination						
	SMN	SMS	SMC	MN	MS	MC	CK
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content/(g/kg)	0.39	0.25	0.22	0.31	0.37	0.42	0.02
土壤碱解氮含量 Soil alkaline nitrogen content/(mg/kg)	17.02	11.46	12.27	13.47	15.13	15.62	14.87
土壤速效钾含量 Soil available potassium content/(mg/kg)	23.83	32.08	37.03	31.96	38.7	32.21	71.44
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content/(g/kg)	0.18	0.12	0.12	0.12	0.14	0.15	0.28
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content/(mg/kg)	0.81	0.88	0.99	0.8	0.85	0.82	0.71
土壤有机质含量 Soil organic carbon contents/(g/kg)	3.56	2.41	2.22	3.11	3.23	3.87	2.42
土壤 pH 值 Soil pH	8.45	8.52	8.48	8.65	8.56	8.49	8.6
土壤电导率 Soil bulk electrical conductivity/(mS/m)	146.50	117.08	140.91	142.69	115.95	111.63	89.33
土壤含水率 Soil moisture content/%	11.36	9.70	7.30	10.42	9.29	10.51	7.51
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.29	1.32	1.32	1.32	1.33	1.26	1.30

表中各指标均为 0—40 cm 土层平均值(10 cm 为一层测量后取平均值)

1.4 数据分析与处理

1.4.1 物种重要值计算

物种重要值的计算^[21]:

$$IV = (Hr + Cr + Fr) / 3$$

式中:IV 表示重要值, Hr 表示相对高度, Cr 表示相对盖度, Fr 表示相对频度。

1.4.2 物种多样性计算

物种多样性测度采用物种 Margalef 丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 优势度

指数 (D) 及 Pielou 均匀度指数 (J) 表示^[20]。

Margalef 丰富度指数 (S):

$$S = (S' - 1) / \ln N$$

Simpson 优势度指数 (D):

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

Shannon-Wiener 多样性指数 (H):

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数 (J):

$$J = H / \ln S'$$

式中: S' 为样方中的总物种数; N 为样方中的总个体数; P_i 为 i 种植物个体数占总个体数比例。

1.4.3 生态位计算

采用 Levins 指数计算各物种生态位宽度, 计算公式为^[22]:

$$B_i = - \sum_{j=1}^r (P_{ij} \ln P_{ij})$$

式中, B_i 为物种 i 的生态位宽度, 代表第 i 个物种, r 代表资源状态数, j 代表第 j 个资源状态; $P_{ij} = n_{ij} / N_i$, 它代表物种 i 在第 j 个资源状态下的重要值占该物种在所有资源状态下重要值之和的比例; n_{ij} 代表物种 i 在第 j 个资源状态下的重要值, N_i 代表其在所有资源状态下的重要值之和。

采用 Pianka 指数计算物种间的生态位重叠, 计算公式为^[23]:

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}}$$

式中, Q_{ik} 代表物种 i 与物种 k 之间的生态位重叠指数, 值域为 $[0, 1]$; i 和 k 分别代表两个不同的物种, r 代表资源状态数, j 代表第 j 各资源状态; P_{ij} 和 P_{kj} 分表代表 i 、 k 连个物种在 j 资源状态下的重要值。

1.4.4 总体联结性计算

采用方差比率 (VR)^[24] 分析该群落的总体联结性, 并使用 W 统计量检验显著性。计算公式如下:

$$V_R = \frac{S_T^2}{\delta_T^2}$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2$$

$$\delta_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i)$$

$$P_i = n_i / N$$

式中, S_T 是物种总数, N 是样方总数, T_j 为 j 样方中的物种数, n_i 是 i 物种的样方数, t 为样方中的平均物种数。

在独立性假设下, $VR = 1$, 当 $VR > 1$ 时, 植物群落呈正联结, 当 $VR < 1$ 时, 植物群落呈负联结。植物群落间存在正联结、负联结和不联结。此外, 由于物种间的正联结和负联结可以相互抵消, 因此使用统计 W ($W = N \times VR$) 进一步检验 VR 值与 1 的偏离程度。当 $\chi_{0.95}^2(N) < W < \chi_{0.05}^2(N)$ 时, 物种间无显著正联结; 反之, 物种间存在显著联结性。

1.4.5 种间联结性

利用卡方检验 (χ^2) 和 Pearson 相关性计算群落内物种的种间联结性。建立种对间的 2×2 列联表, 统计 a , b , c , d 的值。 a 为 A、B 两物种同时存在的样方数, b 为 B 物种存在而 A 物种不存在的样方数, c 为 A 物种存在

而 B 物种不存在的样方数, d 为 A、B 两物种均不存在的样方数。

使用卡方检验(χ^2)来检验物种间联结性,公式如下^[25]:

$$\chi^2 = \frac{N [(|ad-bc|) - (1/2)N]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

N 为样方数,当 $ad > bc$ 时,种对间联结为正,当 $ad < bc$ 时,种对间联结为负。当 $\chi^2 < 3.841$ 时,种对间不联结;当 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ 时,种对间存在着联结;当 $\chi^2 > 6.635$ 时,种对间为显著联结。

Pearson 相关性公式如下^[25]:

$$r_{s(i,k)} = \left[\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k) \right] / \sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}$$

$r_{s(i,k)}$ 为样方中种 i 和种 k 之间的 Pearson 相关系数, N 为样方总数, x_{ij} 和 x_{kj} 分别为种 i 和种 k 的多度;构成向量 x_i 和 x_k 分别是物种 i 和 k 在 j 样方种的重要值的平均值。 $r_{s(i,k)}$ 的值在 $(0, 1]$ 为正相关, $r_{s(i,k)}$ 的值在 $[-1, 0)$ 为负相关, $r_{s(i,k)}$ 为 0 时不相关。

1.4.6 数据分析

通过 Excel 2021 软件对数据进行初步整理计算及标准误差处理,利用 SPSS 26.0 软件对植被特征及物种多样性进行单因素方差分析(One way ANOVA)后借助 Origin 2025 软件绘图。利用 R 4.4.2 中的 spaa 包计算生态位宽度、生态位重叠、总体联结性、 χ^2 统计量及联结程度。植物群落特征及生态位特征与环境因子间的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)排序采用 Canoco 5 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同草种组合补播对植物群落特征的影响

2.1.1 植物群落数量特征

如图 1 所示,补播第 6 年,试验区草地植物群落以多年生草本为主,各处理中封育草地(CK)的物种总数最多,沙生冰草+蒙古冰草+沙打旺(SMS)处理群落地上生物量最大,沙生冰草+蒙古冰草+沙打旺(SMS)处理与沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪(SMC)处理群落盖度大小相近,而群落平均高度最高的是蒙古冰草+牛枝子(MN)处理。除此之外,封育草地(CK)虽然物种总数为各处理最多,但群落地上生物量、盖度、平均高度均在各处理间最小($P < 0.05$),其中群落平均高度仅与处理间最大值差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 物种多样性变化

如图 3 所示,除 Pielou 均匀度指数外,封育草地(CK)其余三种多样性指数虽稍高于补播处理,但差异不显著($P > 0.05$);六个不同草种组合补播草地中,沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪(SMC)处理四种多样性指数呈现最高;沙生冰草+蒙古冰草+牛枝子(SMN)、沙生冰草+蒙古冰草+沙打旺(SMS)以及沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪(SMC)处理的四种物种多样性指数普遍高于补播 2 种草种的处理(蒙古冰草+牛枝子(MN)、蒙古冰草+沙打旺(MS)、蒙古冰草+草木樨状黄芪(MC))。总体而言,补播后各处理物种多样性指数间存在一定差异,但差异并不显著($P > 0.05$)。

2.2 补播草种组合对物种生态位的影响

2.2.1 物种重要值及其生态位宽度

如表 3 所示,SMN 与 MN 处理中蒙古冰草和牛枝子为主要的优势物种,SMS 与 MS 处理中蒙古冰草和沙打旺为主要优势物种,而其余三个处理(SMC、MC、CK)的主要优势物种为草木樨状黄芪和蒙古冰草;各处理优势物种与补播物种基本一致,蒙古冰草在各处理中均为优势物种,但沙生冰草在 SMN 与 SMS 处理中的长势均不好,仅在 SMC 处理中有出现。

生态位宽度是物种对环境资源利用情况的客观直接反应,由表 3 可知,连同封育草地(CK)在内,七个处理生态位宽度在 2 以上的植物分别有 8(SMN)、9(SMS)、7(SMC)、8(MN)、4(MS)、8(MC)、12(CK)个,分别

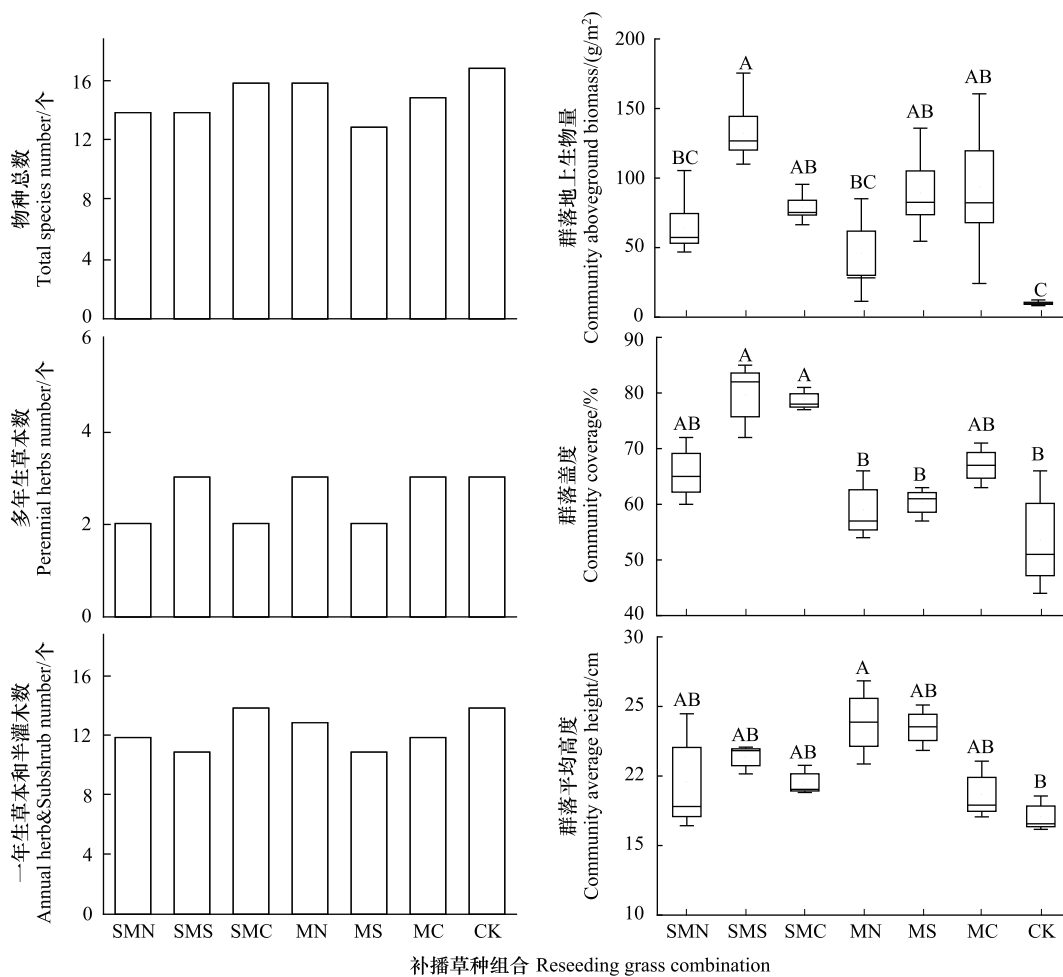


图 1 不同草种组合植物数量特征

Fig.1 Species quantitative characteristics of different grass combination plants

不同大写字母表示草种组合处理间植被特征存在显著差异 ($P < 0.05$); SMN: 33.33% 沙生冰草 + 33.33% 蒙古冰草 + 33.33% 牛枝子; SMS: 33.33% 沙生冰草 + 33.33% 蒙古冰草 + 33.33% 沙打旺; SMC: 33.33% 沙生冰草 + 33.33% 蒙古冰草 + 33.33% 草木状黄芪; MN: 66.67% 蒙古冰草 + 33.33% 牛枝子; MS: 66.67% 蒙古冰草 + 33.33% 沙打旺; MC: 66.67% 蒙古冰草 + 33.33% 草木樨状黄芪; CK: 天然禁牧封育草地

占到各处理物种总数的 57.14%、69.23%、50.00%、53.33%、33.33%、57.14%、75.00%，占比除 MS 处理外，均达到 50% 以上。可见，各处理中大部分物种均能够有效的利用环境资源，对于补播物种而言，除沙生冰草外，各补播物种在各处理样地中均能有效的利用环境资源。

2.2.2 生态位重叠

由图 4 所示，各处理中物种分别组成种对 91 (SMN)、91 (SMS)、120 (SMC)、120 (MN)、78 (MS)、105 (MC)、136 (CK) 组，且均为绝大多数 ($> 90\%$) 种对间存在生态位重叠；生态位重叠明显 ($Q_{ik} \geq 0.5$) 的种对分别有 72、75、107、93、68、83、124 组，各占种对总数的 79.12%、82.42%、89.17%、77.50%、87.18%、79.05%、91.85%，不难看出物种在各处理中对资源的竞争都比较激烈，其中封育草地 (CK) 物种对资源的竞争最为激烈。

2.3 补播草种组合对植物种间关系的影响

2.3.1 总体联结性

如表 4 所示，SMN、SMS、MS 处理的方差比率 VR 分别为 0.13、0.39、0.50，均小于 1，但仅有 SMN 处理的检验统计量 W 未落入 $\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}$ 区间内，说明 SMN、SMS、MS 处理物种间呈负联结关系，但仅有 SMN 处理表现为显著负联结；同理，SMC、MN、MC 及 CK 处理方差比率 VR 分别为 2.52、1.66、1.54、3.32，而 SMC、CK 处理的检验统计量 W 未落入 $\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}$ 区间内，说明 SMC、MN、MC 及 CK 处理物种间呈正联结关系，其

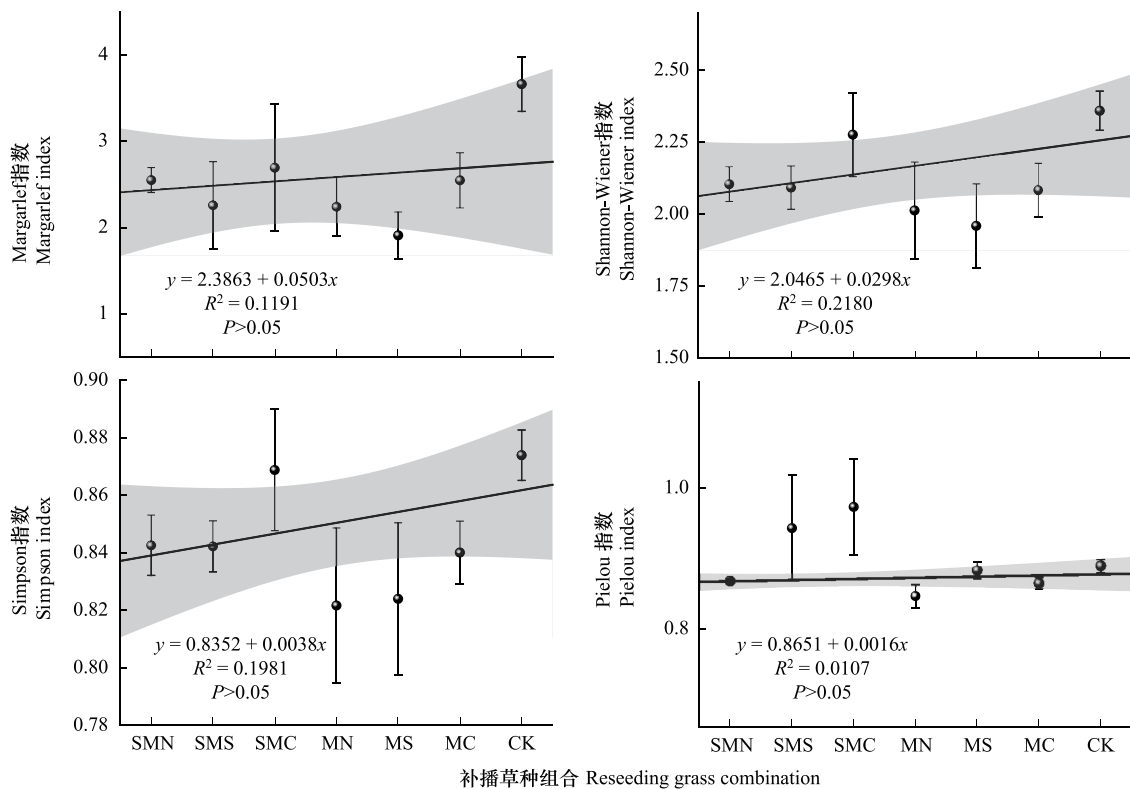


图2 不同草种组合物种多样性指数

Fig.2 Species diversity index of different grass species combinations

图中阴影部分表示物种多样性指数线性拟合的 95%置信带

中 SMC、CK 处理表现为显著正联结。

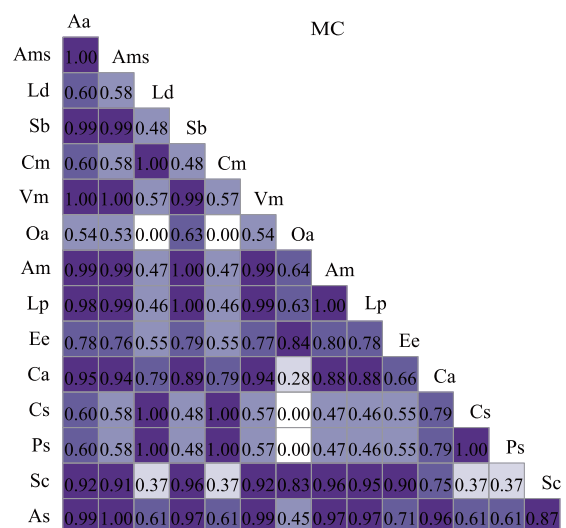
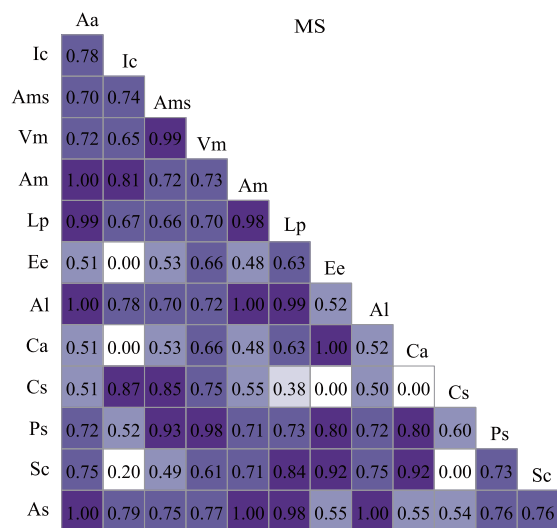
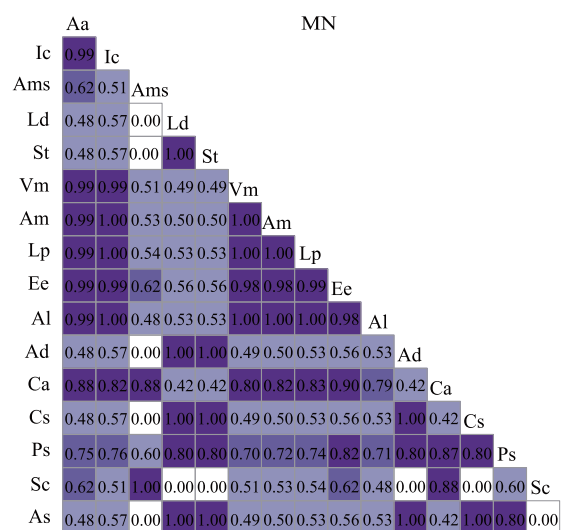
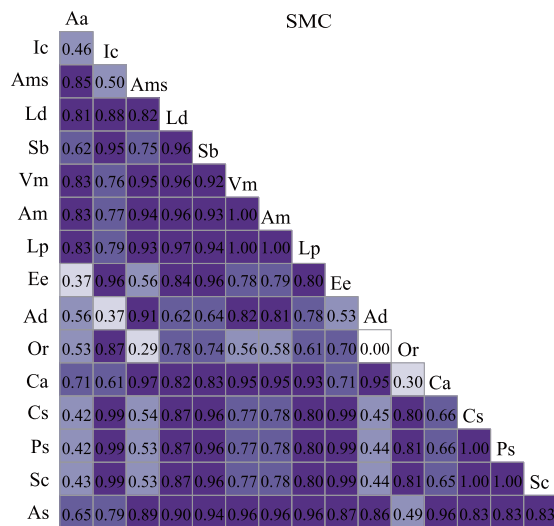
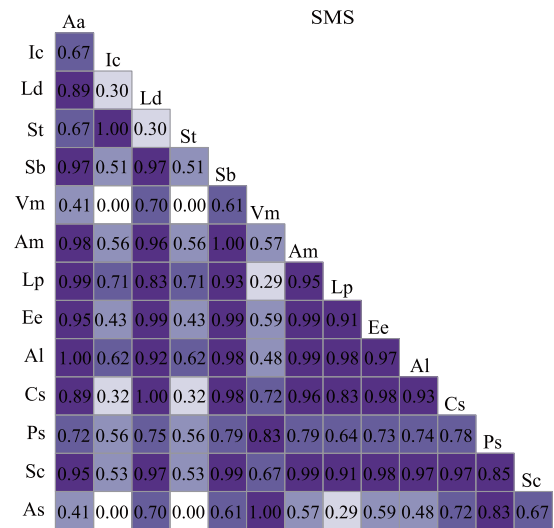
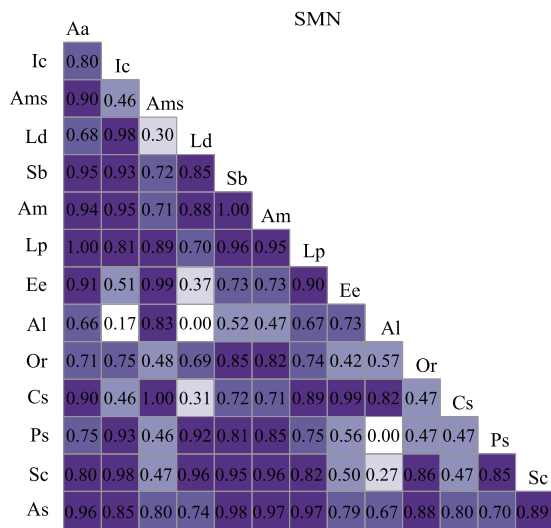
2.3.2 种间联结性

如图 5 所示,不同处理物种间显著正联结种对数分别为 33 (SMN)、35 (SMS)、47 (SMC)、38 (MN)、27 (MS)、36 (MC)、49 (CK) 组,其中极显著正联结分别有 28、24、32、31、19、30、29 组;不同处理间显著负联结种对数分别为 43 (SMN)、41 (SMS)、51 (SMC)、56 (MN)、35 (MS)、43 (MC)、48 (CK) 组,其中极显著负联结分别有 33、27、29、21、22、31、39 组;不同处理的显著联结正负比分别为 0.76、0.85、0.92、0.68、0.77、0.84、1.02,除天然草地外不同草种组合补播处理均为负联结占优势。由此可知,补播后的群落中物种组成的种对大多数达到显著关系,种间关联性较强,绝大多数物种间呈现彼此相互竞争的共生关系。

2.4 不同草种组合补播下植物群落特征和生态位与土壤因子的关系

对不同草种组合植物群落特征及对 7 种主要物种生态位宽度、生态位重叠与环境因子间进行 DCA 分析,结果显示物种矩阵长度排序梯度长度小于 3,表明不同草种组合群落植物数量特征和物种多样性指数与环境因子间的关系用冗余分析 (RDA) 较合适,分析结果如图 5 所示。不同草种组合植物群落特征及生态位特征与环境因子的第一、二轴累计解释率达到 67.95%,由此可知第一、二排序轴可以解释大部分植物数量特征及物种多样性指数与环境因子间的关系。同时经过冗余分析 (RDA) 排序并剔除贡献率低的环境因子,得到 6 个贡献率较高的环境因子。

由图 5 可知,就植物数量特征而言,土壤全氮含量仅与群落盖度呈负相关关系,土壤速效磷含量仅与群落平均高度呈负相关关系,土壤电导率和土壤容重与群落密度、盖度、地上生物量及平均高度均呈正相关关系,土壤 pH 值与群落平均高度呈正相关关系而与群落地上生物量、群落盖度、群落密度呈负相关关系,土壤碱解氮含量与群落密度和平均高度呈正相关关系而与群落地上生物量和群落盖度呈负相关关系。对于物种多样性指数来说,土壤电导率仅与 Pielou 均匀度指数呈正相关关系,土壤速效磷含量与 Margalef 丰富度指数呈负



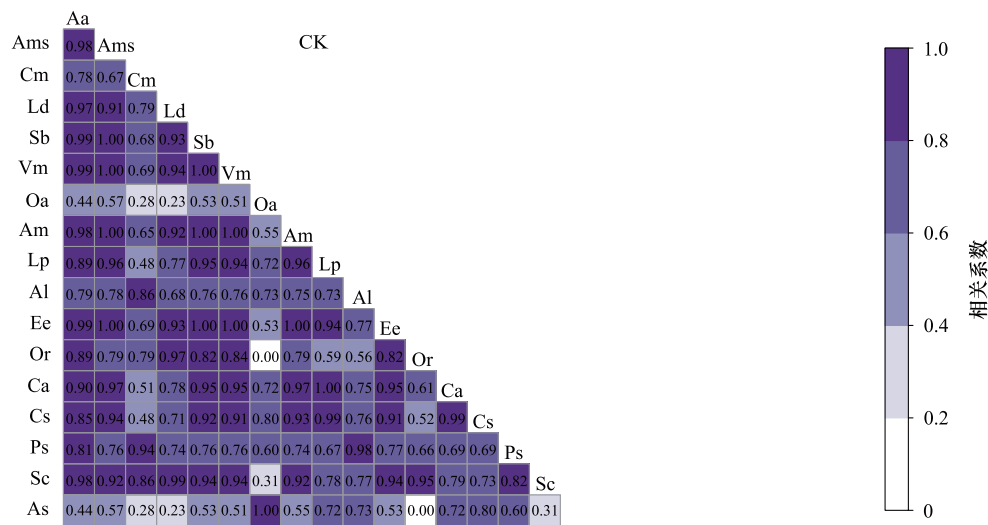


图3 不同草种组合物种 Pianka 生态位重叠指数

Fig.3 Pianka niche overlap index of different grass species combination

Aa:阿尔泰狗娃花 *Aster altaicus*; Ic:白茅 *Imperata cylindrica*; Ams:草木樨状黄芪 *Astragalus melilotoides*; Ld:叉枝鸦葱 *Lipschitzia divaricata*; St:刺沙蓬 *Salsola tragus*; Sb:短花针茅 *Stipa breviflora*; Cm:光药大黄花 *Cymbaria mongolica*; Vm:老瓜头 *Vincetoxicum mongolicum*; Oa:猫头刺 *Oxytropis aciphylla*; Am:蒙古冰草 *Agropyron mongolicum*; Lp:牛枝子 *Lespedeza potaninii*; Ee:乳浆大戟 *Euphorbia esula*; Al:沙打旺 *Astragalus laxmannii*; Ad:沙生冰草 *Agropyron desertorum*; Or:砂珍棘豆 *Oxytropis racemosa*; Ps:西伯利亚远志 *Polygala sibirica*; Ca:银灰旋花 *Convolvulus ammannii*; Cs:隐子草 *Cleistogenes serotina*; Sc:猪毛菜 *Salsola collina*; As:猪毛蒿 *Artemisia scoparia*

相关关系,土壤 pH 与 Margalef 丰富度指数呈正相关关系而与其余 3 种多样性指数呈负相关关系,土壤容重、土壤全氮含量及土壤碱解氮含量与 4 种多样性指数均呈现负相关关系。而对于生态位特征来说,无论是生态位宽度还是生态位重叠,仅有土壤速效磷含量与多数物种间呈正相关关系,其余环境因子均与多数物种生态位宽度和生态位重叠间呈负相关关系。

3 讨论

3.1 不同草种组合补播下植物群落特征的变化

作为表征草原群落结构与生态功能的核心指标,高度、盖度和密度的协同提升不仅反应了植被的生长动态^[26–27],更通过生物量积累和资源分配深刻影响着生态系统服务功能^[28]。现有研究表明,基于乡土草种的补播策略能有效突破草地自然恢复瓶颈,在加速植被重建的同时,通过优化种间配置显著提升群落结构稳定性与生产力水平^[29]。本研究发现,研究区多年生草本植物在补播后虽未显著增加物种总数,但关键数量特征均实现正向提升。具体而言,沙生冰草+蒙古冰草+沙打旺组合表现出最大的地上生物量积累,其植被盖度与沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪处理相当,而蒙古冰草+牛枝子组合则形成最高冠层高度。这验证了禾豆 2:1 配比模式在干旱贫瘠生境中强化植物资源获取能力的可行性,与吴宛萍等^[10]在盐池荒漠草原的研究结论形成互证。值得注意的是,尽管补播 3 种物种组合的多样性指数普遍优于补播 2 种物种的组合,但沙生冰草的存活率限制可能削弱了其多样性提升的贡献,而天然草原物种多样性指数大多高于补播处理,这与李永康等^[15]关于天然草地多样性优势的研究发现具有一致性。

总体而言,补播对物种多样性的影响具有一定的复杂性。在大多数情况下,补播能够通过增加植物种类和改善群落结构来提高物种多样性^[8–10]。然而,在某些特定条件下如单一优势种的出现或本地物种的竞争能力提高,补播可能会降低物种多样性^[30–31]。因此,在实施补播时需要综合考虑补播种类、时间、方法以及与其他生态修复措施的协同效应,以达到最佳的生态修复效果。

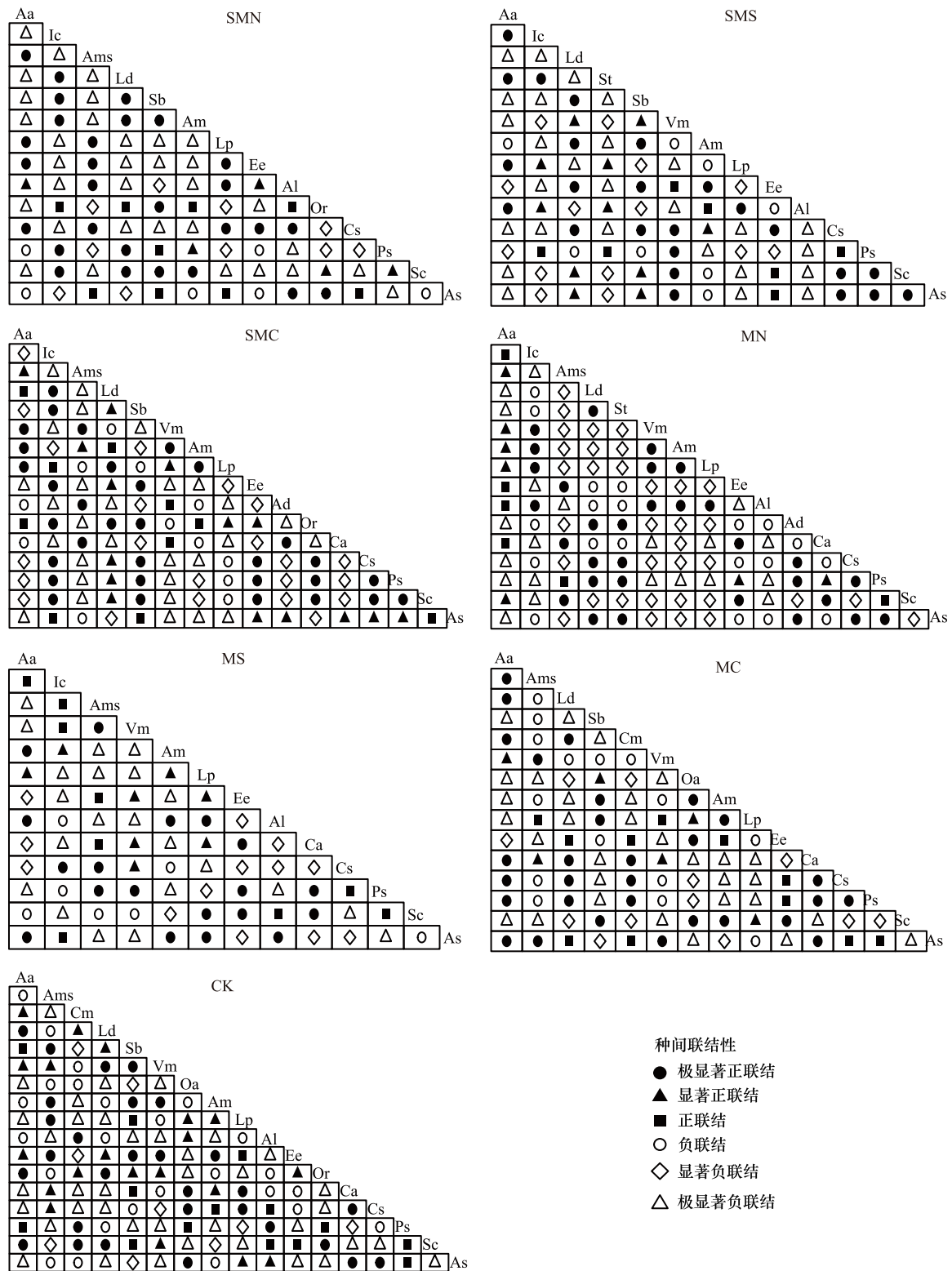


图 4 不同草种组合物种间联结性检验 (Pearson)

Fig.4 Interspecific association test (Pearson) of different grass species combinations

表 3 不同草种组合物种重要值及其生态位宽度

Table 3 Important value and niche width of species in different grass species combination																					
物种名称 Species	SMN			SMS			SMC			MN			MS			MC			CK		
	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width	重要值 Important value	生态位宽度 Niche width		
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	0.05	2.88	0.09	2.89	0.06	1.89	0.06	2.96	0.09	2.94	0.05	2.99	0.08	2.92							
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	0.09	2.38	0.03	1.00	0.04	1.86	0.06	2.97	0.07	1.86											
草木樨状黄芩 <i>Astragalus melilotoides</i>	0.07	1.93			0.16	2.59	0.07	1.00	0.12	1.90	0.23	2.99	0.23	2.98							
叉枝鸭葱 <i>Lipschitzia divaricata</i>	0.02	1.91	0.04	2.72	0.03	2.76	0.02	1.00			0.03	1.00	0.02	2.54							
刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>			0.04	1.00			0.03	1.00													
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	0.05	2.95	0.08	2.98	0.08	2.65					0.12	2.96	0.04	2.98							
光药大黄花 <i>Cymbaria mongolica</i>											0.01	1.00	0.03	1.55							
老瓜头 <i>Vincetoxicum mongolicum</i>			0.03	1.00	0.03	2.99	0.03	2.91	0.04	1.99	0.05	2.99	0.05	2.97							
猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>											0.02	1.00	0.02	1.00							
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	0.24	2.94	0.25	3.00	0.18	2.99	0.21	2.95	0.23	2.94	0.20	2.95	0.11	2.97							
牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	0.17	2.92	0.07	2.70	0.10	2.99	0.20	2.97	0.06	2.85	0.06	2.94	0.07	2.69							
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	0.03	2.00	0.04	2.90	0.03	2.00	0.02	2.99	0.02	1.00	0.02	1.92	0.08	2.98							
沙打旺 <i>Astragalus laxmannii</i>	0.08	1.00	0.18	2.96			0.09	2.92	0.17	2.94			0.04	2.00							
沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i>					0.07	1.99	0.04	1.00													
砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	0.02	1.94			0.01	1.00					0.03		0.03	1.93							
西伯利亚远志 <i>Polygala sibirica</i>			0.06	1.92	0.04	1.95	0.07	1.96	0.04	1.96	0.06	1.00	0.08	1.96							
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	0.03	2.71			0.03	2.71	0.02	2.27	0.01	1.00	0.03	2.61	0.03	2.74							
隐子草 <i>Cleistogenes serotina</i>	0.02	1.94	0.02	2.75	0.03	1.96	0.02	1.00	0.01	1.00	0.02	1.00	0.02	2.57							
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	0.03	2.46	0.03	2.96	0.03	1.95	0.02	1.00	0.07	1.73	0.03	2.61	0.06	2.63							
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.10	2.92	0.05	1.00	0.06	2.86	0.04	1.00	0.08	2.98	0.05	2.93	0.03	1.00							

表 4 不同草种组合物种总体联结性

Table 4 The overall association of species in different grass species combinations

补播草种组合 Reseeding grass combination	方差比率 (VR) Variation ratio	检验统计量 (W) Test statistic	χ^2 临界值 χ^2 threshold	检验结果 Results
SMN	0.13	0.63	(1.15, 11.05)	显著负联结
SMS	0.39	1.94	(1.15, 11.05)	不显著负联结
SMC	2.52	12.58	(1.15, 11.05)	显著正联结
MN	1.66	8.28	(1.15, 11.05)	不显著正联结
MS	0.50	2.50	(1.15, 11.05)	不显著负联结
MC	1.54	7.71	(1.15, 11.05)	不显著正联结
CK	3.32	13.28	(0.71, 9.49)	显著正联结

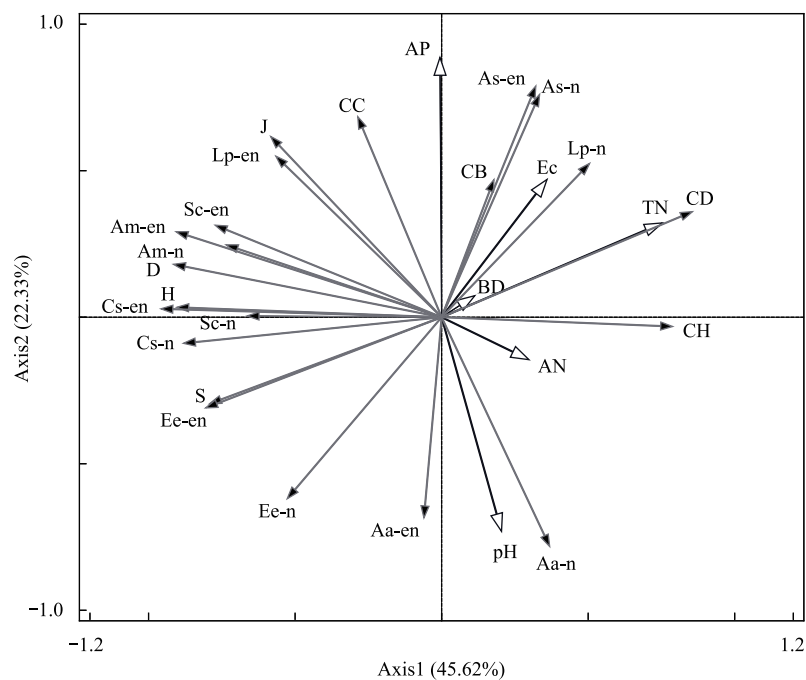


图 5 不同草种组合植物群落特征和生态位特征与环境因子 RDA 分析排序图

Fig.5 Plant community characteristics and niche characteristics of different grass species combinations and RDA analysis ordination of environmental factors

CC: 群落盖度 Community coverage; CD: 群落密度 Community density; CH: 群落平均高度 Community average height; CB: 群落地上生物量 Community above-ground biomass; S: Margalef 丰富度 Margalef richness; D: Simpson 优势度 Simpson dominance degree; H: Shannon-Wiener 多样性 Shannon-Wiener diversity; J: Pielou 均匀度 Pielou uniformity; TN: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; AP: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; AN: 土壤碱解氮含量 Soil alkaline nitrogen content; pH: 土壤 pH Soil pH; Ec: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; BD: 土壤容重 Soil bulk density; -n: 生态位宽度 Species niche width; -en: 生态位重叠 niche overlap

3.2 不同草种组合补播下群落生态位和种间关系的变化

生态位宽度与生态位重叠在解析物种共存机制、资源分配策略及生态系统功能维持中发挥重要作用。本研究发现,除蒙古冰草+沙打旺的处理外,其余各处理中生态位宽度 2 以上的物种数占比均达到 50% 以上,而生态位宽度是指一个物种在特定环境中能够适应并生存的资源范围或环境条件的广度,其大小反映了物种对资源的利用能力和适应性,具有较大生态位宽度的物种通常表现出更强的生态可塑性,能够通过多维资源利用实现生态位拓展,反之生态位较小的物种则依赖特化策略适应特定环境条件^[32-33],由此可见本研究各处理中大部分物种均能够有效的利用环境资源。对于生态位重叠,本研究发现试验区草原物种间对资源的竞争激

烈,而不同草种补播后物种间生态位重叠明显($Q_{ik} \geq 0.5$)的种对比例相较于天然草地均有不同程度的降低。通常来说,生态位宽度较大的物种更容易与其他物种共存,因为它们能够适应更广泛的资源和环境条件^[34],而生态位重叠较大的物种之间可能会发生激烈的资源竞争,从而影响共存的可能性^[35]。所以,从本研究结果而言,补播的乡土草种草木樨状黄芪、沙打旺、蒙古冰草和牛枝子长势较好,逐渐成为试验地优势物种,各物种生态位宽度整体提高,增加了对环境资源的利用,说明各补播草种与原有天然物种趋于竞争共存^[36],群落结构稳定性提高^[13],

研究种间的联结性可以了解物种间的相互作用机制,理解群落结构和动态变化^[37-38]。本研究发现,天然草地群落总体联结性呈现显著正联结关系,而不同草种组合补播后总体联结性不尽相同,呈现正联结与负联结的补播草种组合处理均为3个,且均有一个组合处理呈现为显著联结关系,分别为沙生冰草+蒙古冰草+牛枝子处理(显著负联结)、沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪(显著正联结);同时物种间联结性结果显示,除天然草地外,各处理中呈显著负联结的种对数均高于呈现显著正联结的种对数。种间联结性作为群落内部物种间的相互作用和竞争关系的动态变化的体现,随着群落演替的更新,物种间对环境资源利用越相似,种间正关联性可能越强,也可能趋于无关联,有利于物种稳定共存,群落向顶级方向演替^[39]。综上看来,各处理中总体联结性检验结果与种间联结性结果存在出入,可见补播草种与原有天然物种对资源产生了不可避免的种间竞争关系^[40],物种之间关联性较强,植物群落结构与功能趋于复杂^[41],蒙古冰草、沙打旺等植物作为优势物种对环境资源利用率较好,打破了原生植被的种间竞争平衡关系,改变了其他物种的生存空间^[42]。

3.3 不同草种组合补播下植物群落特征与生态位特征变化的环境解释

土壤是植被生存繁衍的基础载体,土壤通过理化性质的时空异质性直接调控植物群落构建过程与生态系统功能表达^[43-44]。有研究表明,退化草原植物地上生物量与土壤养分库存在显著耦合关系,其中土壤有机质、全氮及速效氮等指标可作为草原退化程度的直接体现^[45]。基于此,本研究选取10项土壤指标作为环境因子,解析其与植物群落及生态位特征的互作机制。冗余分析结果显示,筛选出的6个环境因子中,土壤全氮含量、土壤速效磷含量及土壤pH值是与植物群落特征及生态位特征相关性较大的环境因子,他们通过直接或间接途径驱动植物群落结构和生态位分化,其空间异质性通过资源分配和种间竞争塑造了多样性格局。研究区作为典型退化草原,补播措施引发的物种竞争格局转变导致养分周转加速,新生优势种在夏季生长旺盛期对土壤养分的超量吸收^[46],叠加样地环境同质化特征(地理位置相邻、无微地形影响),共同导致土壤养分储量下降与肥力退化^[47-48];土壤pH值作为影响植物生态位特征的重要环境因子,它不仅决定了植物对资源的利用能力从而影响了植物群落的结构和功能^[49-50],更与其他环境因子(如土壤有机质、总氮、总磷等)之间存在复杂的交互作用,并受到地形和其他环境条件变化的影响^[51-52]。

冗余分析结果还显示,植物群落特征特别是多样性指数与生态位特征间存在着正相关关系,可见生态位特征的变化可以在一定程度上反应植物群落演替过程中的群落动态;生态位重叠可以促进物种间的竞争或合作,从而影响群落的稳定性和多样性^[53]。值得注意的是,环境梯度作为驱动植物群落结构形成的重要因素,在不同环境梯度下,植物通过调整其功能特性和生态位来适应环境变化,正如在加州沿海的研究中,植物群落的功能特性沿梯度表现出显著的空间异质性,这种异质性是由于物种间竞争和资源分配的结果^[54]。总体而言,对植物群落特征和生态位特征间关系的研究,可以为理解补播干预下的群落结构变化提供一定的理论视角。

4 结论

宁夏退化荒漠草原乡土草种补播研究发现,补播显著提升了植物群落生物量、盖度和高度,其中沙生冰草+蒙古冰草+沙打旺组合的地上生物量与群落盖度高,而蒙古冰草+牛枝子组合的群落高度最大。3物种组合补播在多样性表现上优于2物种,沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪组合多样性最大。生态位分析显示,多数补播物种生态位宽度超过2,且生态位重叠种对比例降低,补播有效缓解了草地的种间竞争。种间联结模

式封育草地以显著正联结为主,而补播草地形成正负联结共存格局,其中沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪组合维持显著正联结。土壤速效磷、全氮和 pH 通过直接或间接途径共同塑造植物群落特征与生态位格局。综合试验结果,研究认为沙生冰草+蒙古冰草+草木樨状黄芪组合为当地退化荒漠草原补播的最优草种组合。

参考文献 (References):

- [1] Quan Z J, Cheng Y X, Tsubo M, Shinoda M. Sensitivity and regulation factors of soil organic carbon content in steppe and desert—steppe grasslands of the Mongolian Plateau. *Plant and Soil*, 2025, 509(1): 399-415.
- [2] 刘润红, 陈乐, 涂洪润, 梁士楚, 姜勇, 李月娟, 黄冬柳, 农娟丽. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结. *生态学报*, 2020, 40(6): 2057-2071.
- [3] 涂洪润, 李娇凤, 杨丽婷, 白金莲, 卢国琼, 利恒春, 梁士楚, 姜勇. 桂林岩溶石山青冈群落主要乔木树种的种间关联. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 67-76.
- [4] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments: re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 1997, 110(4): 449-460.
- [5] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 2002, 83(7): 2027.
- [6] Ma Y M, Li Q H, Pan S P, Liu C, Han M S, Brancelj A. Niche and interspecific associations of *Pseudanabaena limnetica*-Exploring the influencing factors of its succession stage. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108806.
- [7] Sanjerehei M M, Rundel P W. A comparison of methods for detecting association between plant species. *Ecological Informatics*, 2020, 55: 101034.
- [8] 张永超, 牛得草, 韩潼, 陈鸿洋, 傅华. 补播对高寒草甸生产力和植物多样性的影响. *草业学报*, 2012, 21(2): 305-309.
- [9] 杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. *草地学报*, 2018, 26(5): 1071-1077.
- [10] 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 周瑶, 宿婷婷, 朱琳. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959-1969.
- [11] 张伟, 王万林, 胡玉昆, 尹伟, 公延明, 房飞, 阿德列提·艾列吾塔力甫. 新疆伊犁荒漠草原恢复措施下植物群落生态位特征分析. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 358-362.
- [12] 火久艳, 尹亚丽, 赵文, 等. 放牧通过增强草地植物种间关联性维持系统稳定. *草业科学*, 2025, 42(04): 894-906.
- [13] 刘秀梅, 倪兆春, 李小锋. 补播天然草地不同年限群落特征分析. *草食家畜*, 2023(4): 61-66.
- [14] Lu Q, Ma H B, Zhou Y, Liu J D, Shen Y. Restoration of soil quality of degraded grassland can be accelerated by reseedling in an arid area of Northwest China. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1101295.
- [15] 李永康, 许冬梅, 撒春宁, 王星, 宋珂辰. 乡土物种对退化荒漠草原的改良效果研究. *中国草地学报*, 2022, 44(6): 36-45.
- [16] 张永辉, 王汝富, 许国成, 杨彦东, 金加明. 草地补播对甘南“黑土滩”型退化草甸生产特征的影响. *中国草食动物科学*, 2022, 42(3): 42-46.
- [17] 武海霞, 王则宇, 尹强, 张波. 我国北方荒漠草原退化研究进展. *内蒙古林业科技*, 2017, 43(2): 58-62.
- [18] 覃林. 统计生态学. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [19] 鲍士旦. 土壤化学分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 龚昕, 霍新茹, 李雯, 杨彦东, 刘超, 秦伟春, 沈艳, 王国会, 马红彬. 宁夏罗山山地草原植被群落特征及其空间分异. *草业学报*, 2025, 34(2): 1-15.
- [21] 段敏杰, 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 郭亚奇, 旦久罗布, 洛桑加措. 放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响. *生态学报*, 2010, 30(14): 3892-3900.
- [22] Levins R. *Evolution in Changing Environments: Some Theoretical Explorations*. (MPB-2), Princeton: Princeton University Press, 1968.
- [23] Pianka E R. The Structure of lizard communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 53-74.
- [24] Schluter D. A Variance Test for Detecting Species Associations, with Some Example Applications. *Ecology*, 1984, 65(3).
- [25] 杜忠毓, 邢文黎, 薛亮, 肖江, 陈光才. 喀斯特石漠化梯矿区植物群落主要物种生态位特征及其种间联结. *生态学报*, 2023, 43(7): 2865-2880.
- [26] 杨元合, 饶胜, 胡会峰, 陈安平, 吉成均, 朱彪, 左闻韵, 李轩然, 沈海花, 王志恒, 唐艳鸿, 方精云. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系. *生物多样性*, 2004(1): 200-205.
- [27] 张彩琴, 张军, 李茜若. 草地植被生物量动态研究视角与研究方法评述. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 1143-1151.
- [28] 孙伟, 刘玉玲, 王德平, 赵敏, 杨合龙, 宋倩, 肖红, 王开丽, 曹婧, 戎郁萍. 补播羊草和黄花苜蓿对退化草甸植物群落特征的影响. *草地*

- 学报, 2021, 29(8): 1809-1817.
- [29] 张英俊, 周冀琼, 杨高文, 荆晶莹, 刘楠. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. 科学通报, 2020, 65(16): 1546-1555.
- [30] 付珣, 沈有信, 徐晓莹, 袁闯. 不同播前处理对滇东北草地土著物种的控制效应. 草学, 2024(5): 8-14+23.
- [31] 徐晓莹, 沈有信, 袁闯, 陈发军, 代文. 昭通南方草地本地物种群落特征对耕耙与补播处理的响应. 草地学报, 2023, 31(8): 2481-2489.
- [32] 刘润红, 常斌, 荣春艳, 姜勇, 杨瑞岸, 刘星童, 曾惠帆, 傅桂焕. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种群生态位. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3917-3926.
- [33] 陈玉凯, 杨琦, 莫燕妮, 杨小波, 李东海, 洪小江. 海南岛霸王岭国家重点保护植物的生态位研究. 植物生态学报, 2014, 38(6): 576-584.
- [34] 李晓东, 巢欣, 刘惠秋, 杨清, 杨胜嫔, 巴桑. 雅鲁藏布江中游浮游植物群落优势种时空生态位. 生态学报, 2023, 43(18): 7746-7760.
- [35] 王司权, 潘保柱, 杨子杰, 胡恩, 张鑫, 李刚, 赵丹, 胡竞翔. 泾河流域浮游动物群落特征及优势种种间关系. 应用生态学报, 2025, 36(02): 587-595.
- [36] 赵国华. 典型草原退化区域牧草补播及土壤改良措施. 农村科技, 2022(5): 57-61.
- [37] Nan Q R, Zhang Q, Li X H, Zheng D N, Li Z H, Zhao L Y. Niche and interspecific association of the dominant species during the invasion of *Alternanthera philoxeroides* in the Yangtze River Basin, China. *Agriculture*, 2023, 13(3): 621.
- [38] Zhang Y Y, Zhou W M, Yuan Q, Deng J J, Zhou L, Yu D P. Niches, interspecific associations, and community stability of main understory regeneration species after understory removal in temperate forests. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1371898.
- [39] Hu J T, Zheng Z L, Wen X Y, Hu X S, Lin Y M, Li J, Ni J, Wu C Z. Variation in niche and interspecific associations across elevations in subtropical forest communities of the Wuyi Mountains, southeastern China. *Forests*, 2024, 15(7): 1256.
- [40] 郭川, 赵艳兰, 李香君, 周冀琼, 刘琳, 孙飞达, 白彦福, 马骢毓. 不同豆禾混播比例对植物种间关系及草地生产力的影响. 草业科学, 2022, 39(11): 2307-2316.
- [41] 刘菊红, 王忠武, 韩国栋. 重度放牧对荒漠草原主要植物种间关系及群落稳定性的影响. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2595-2602.
- [42] 晏和飘, 李文龙, 梁天刚, 周华坤, 曹亚鹏, 廖元成. 青藏高原退化高寒草地恢复对不同措施响应的 Meta 分析. 草地学报, 2021, 29(S1): 190-198.
- [43] Guo X X, Zuo X A, Yue P, Li X Y, Hu Y, Chen M, Yu Q. Direct and indirect effects of precipitation change and nutrients addition on desert steppe productivity in Inner Mongolia, northern China. *Plant and Soil*, 2022, 471(1): 527-540.
- [44] Wang Z, Johnson D A, Rong Y, Wang K. Grazing effects on soil characteristics and vegetation of grassland in northern China. *Solid Earth*, 2016, 7(1): 55-65.
- [45] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究. 中国草地学报, 2013, 35(3): 77-84.
- [46] 刘玉, 常小峰, 田福平, 刘振恒, 党志强, 武高林. 放牧对草地群落与土壤特征的影响. 西北植物学报, 2016, 36(12): 2524-2532.
- [47] 万志强, 杨九艳, 谷蕊, 闫玉龙, 梁艳, 杨劼, 高清竹. 不同刈割频率对大针茅草原群落特征及土壤元素含量的影响. 生态学报, 2016, 36(17): 5477-5484.
- [48] 杨静, 孙宗玖, 巴德木其其格, 马慧敏, 董乙强. 封育对草地植被功能群多样性及土壤养分特征的影响. 中国草地学报, 2018, 40(4): 102-110.
- [49] 段后浪, 赵安, 姚忠. 恒湖农场茶叶港草洲枯水期湿地植物与土壤关系及种群生态位分析. 生态学报, 2017, 37(11): 3744-3754.
- [50] 张贺全, 孙饶斌, 冶民生, 吴斌, 关文彬, 马克明, 刘国华. 岷江源区主要灌木种群生态位研究. 水土保持研究, 2012, 19(1): 125-129, 133.
- [51] 肖艳梅, 解婧媛, 姚义鹏, 梁士楚, 高丽娜, 张惠, 莫适祯. 桂林岩溶石山常绿落叶阔叶混交林乔木层优势物种生态位研究. 生态学报, 2021, 41(20): 8159-8170.
- [52] Dibar D T, Zhang K, Yuan S Q, Zhang J Y, Zhou Z Z, Ye X X. Ecological stoichiometric characteristics of Carbon (C), Nitrogen (N) and Phosphorus (P) in leaf, root, stem, and soil in four wetland plants communities in Shengjin Lake, China. *PLoS One*, 2020, 15(8): e0230089.
- [53] 房飞, 胡玉昆, 张伟, 公延明, 柳妍妍, 杨秀娟. 高寒草原植物群落种间关系的数量分析. 生态学报, 2012, 32(6): 1898-1907.
- [54] Luo J F, Deng D Z, Zhang L, Zhu X W, Chen D C, Zhou J X. Soil and vegetation conditions changes following the different sand dune restoration measures on the Zoige Plateau. *PLoS One*, 2019, 14(9): e0216975.