植物资源与环境学报，2025，**34**(3)：79-87
Journal of Plant Resources and Environment

内蒙古阿拉善梭梭人工林林下主要植物的生态位特征和种间联结性

李　星[1]，隋莹莹[1]，辛智鸣[2a,2b]，董　雪[2a,2b]，李　星[2a,2b]，张景波[2a,2b]，孙　静[3]，尚　敏[2a,2b,①]

（1. 内蒙古自治区林业科学研究院 沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010；
2. 中国林业科学研究院：a. 沙漠林业实验中心，b. 内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站，内蒙古 巴彦淖尔 015200；
3. 北京市企业家环保基金会，北京 100020）

摘要：采用群落调查法对内蒙古阿拉善梭梭〔*Haloxylon ammodendron*（C. A. Mey.）Bunge〕人工林进行植物群落踏查，根据 Shannon 指数、Levins 指数和 Pianka 指数对梭梭人工林林下灌木层和草本层主要植物的生态位宽度、生态位重叠进行分析，采用方差比率、χ^2 检验、联结系数分析种间联结性。结果表明：内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层植物有 25 种，草本层植物有 25 种，其中，灌木层主要植物 16 种，草本层主要植物 14 种。梭梭人工林林下红砂〔*Reaumuria songarica*（Pall.）Maxim.〕、白刺（*Nitraria tangutorum* Bobrov）、泡泡刺（*Nitraria sphaerocarpa* Maxim.）、骆驼蓬（*Peganum harmala* Linn.）、盐生草〔*Halogeton glomeratus*（M. Bieb.）C. A. Mey.〕、雾冰藜〔*Bassia dasyphylla*（Fisch. et C. A. Mey.）Freitag et G. Kadereit〕的生态位宽度优势明显。阿拉善梭梭人工林灌木层 16 个主要植物组成的 120 个种对中有 116 个种对的 Pianka 指数小于 0.53，草本层 14 个主要植物组成的 91 个种对中有 90 个种对的 Pianka 指数小于 0.77。灌木层和草本层物种总体生态位重叠较低，总体联结性为显著负联结。χ^2 检验结果表明：灌木层中正联结种对 24 个，负联结种对 96 个；草本层中正联结种对 25 个，负联结种对 66 个。联结系数分析结果表明：灌木层正联结种对 2 个，无联结种对 30 个，负联结种对 88 个；草本层中正联结种对 1 个，无联结种对 32 个，负联结种对 58 个。综合研究结果显示：阿拉善梭梭人工林林下群落处于不稳定演替阶段，多数物种对资源利用的相似程度低。生境差异可能是造成林下物种生态位重叠较低，物种间以负联结为主的主要原因。

关键词：梭梭；人工林；重要值；生态位；种间联结；阿拉善

中图分类号：Q948.15；S728.4；S718.54　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-7895(2025)03-0079-09
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2025.03.07

Niche characteristics and interspecific associations of main plants under *Haloxylon ammodendron* plantations in Alxa of Inner Mongolia

LI Xing[1], SUI Yingying[1], XIN Zhiming[2a,2b], DONG Xue[2a,2b], LI Xing[2a,2b], ZHANG Jingbo[2a,2b], SUN Jing[3], SHANG Min[2a,2b,①] (1. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration for Sandy Land Biological Resources Conservation and Cultivation, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China; 2. Chinese Academy of Forestry Sciences: a. Experimental Center for Desert Forestry, b. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Observation Research Station, Bayannur 015200, China; 3. Beijing Entrepreneurs Environmental Protection Foundation, Beijing 100020, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, **34**(3): 79-87

Abstract: A plant community survey was conducted on the *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia by using the community survey method, the niche width and niche overlap of the main plants in the shrub and herb layers under *H. ammodendron* plantations were

收稿日期：2024-08-27
基金项目：内蒙古自治区水利科技项目(NSK202404)；北京市企业家环保基金会委托项目
作者简介：李　星(1994—)，男，内蒙古固阳人，硕士，研究实习员，主要从事荒漠植物生态学方面的研究。
①通信作者 E-mail：shangmin147@163.com
引用格式：李　星，隋莹莹，辛智鸣，等. 内蒙古阿拉善梭梭人工林林下主要植物的生态位特征和种间联结性[J]. 植物资源与环境学报，2025，34(3)：79-87.

analyzed based on the Shannon index, Levins index, and Pianka index, and the interspecific associations were analyzed by using variance ratio, χ^2 test, and association coefficient. The results show that there are 25 species in the shrub layer and 25 species in the herb layer under *H. ammodendron* plantations in Alxa of Inner Mongolia, among which, there are 16 main plants in the shrub layer and 14 main plants in the herb layer. *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim., *Nitraria tangutorum* Bobrov, *Nitraria sphaerocarpa* Maxim., *Peganum harmala* Linn., *Halogeton glomeratus* (M. Bieb.) C. A. Mey., and *Bassia dasyphylla* (Fisch. et C. A. Mey.) Freitag et G. Kadereit under *H. ammodendron* plantations show evident advantages in niche width. In the shrub layer under *H. ammodendron* plantations in Alxa, 116 out of 120 species pairs composed of 16 main plants have a Pianka index smaller than 0.53, while in the herb layer, 90 out of 91 species pairs composed of 14 main plants have a Pianka index smaller than 0.77. The overall niche overlap of the species in the shrub and herb layers is low, and the overall association is significant negative association. The χ^2 test result shows that there are 24 positively associated species pairs and 96 negatively associated species pairs in the shrub layer; 25 positively associated species pairs and 66 negatively associated species pairs in the herb layer. The association coefficient analysis result shows that there are 2 positively associated species pairs, 30 non-associated species pairs, and 88 negatively associated species pairs in the shrub layer, and 1 positively associated species pair, 32 non-associated species pairs, and 58 negatively associated species pairs in the herb layer. The comprehensive research results indicate that the community under *H. ammodendron* plantations in Alxa is in an unstable succession stage, with a low degree of similarity in resource utilization of most species. Habitat differences may be the main reason for the low niche overlap of the species in the understory and the predominance of negative associations among species.

Key words: *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge; plantation; importance value; niche; interspecific association; Alxa

种间关系是群落生态学研究的核心问题,包含不同物种对有限资源的竞争及不同物种间的稳定共存关系,这种关系可以用生态位和种间联结来表征[1-2]。生态位表示物种在群落中的地位,表征群落中各物种所利用的资源总和及其与其他相关物种间的关系,是物种共存和群落演替的主要驱动力[3-4]。生态位宽度和生态位重叠可以反映物种对资源的利用能力及竞争状态[5]。种间联结是指不同物种在空间分布上的关联性,是不同环境下物种相互作用的体现[6-7]。研究种间联结可以解析群落的种间关系,了解种间的相互作用及物种对生境的适应程度,对生物多样性保护及植被恢复与重建有重要意义[8-9]。目前,对荒漠区植物的种间关系研究涉及不同演替阶段及群落类型。例如:新疆阿勒泰地区草本总体为显著负联结,物种间联结性较低,群落处于不稳定演替阶段[10];新疆艾比湖荒漠区植物群落生态位具有较高的相似性和明显的竞争关系[11];古尔班通古特沙漠南缘植物生态位宽度大,生态位重叠高,可为受损群落植被恢复与重建提供物种选择[12];安西极旱荒漠国家级自然保护区濒危植物裸果木(*Gymnocarpos przewalskii* Maxim.)群落趋于独立存活,群落总体处于不稳定状态[13];民勤绿洲边缘2种生境下的红砂〔*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim〕差异较大,这种差异可为退化林修复提供思路[14]。研究发现,人工林的建植能促进当地生境恢复,有利于植被和生物多样性的重建[15]。林下灌木层和草本层是人工林生态系统的重要组成部分,在维持系统能量流动、物质循环及生态系统稳定性具有重要作用[16-18]。因此,研究林下物种生态位关系能够正确认识群落的结构、功能及演替规律,为植物资源保护、利用及植被恢复与重建提供理论依据[19-20]。

梭梭〔*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge〕为藜科(Chenopodiaceae)梭梭属(*Haloxylon* Bunge)小乔木,横跨欧亚大陆,主要分布于亚非荒漠区[21]。梭梭具有抗旱、耐寒、耐土壤贫瘠、抗风蚀沙埋等特点,是荒漠-绿洲过渡带人工植被防护林建设的首选树种[21-22]。阿拉善地区种植的梭梭人工林面积约 3.38×10^6 hm^2,主要分布在阿拉善左旗、阿拉善右旗和额济纳旗[23]。梭梭人工林构建起阿拉善绿色生态屏障,成功阻断了乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠的连接和贯通[23]。目前,对梭梭人工林的研究主要涉及生理生态研究[24]、群落结构及其物种多样性[25-26]、种群结构及更新[27]及林下土壤化学计量特征[28-29]。关于梭梭人工林林下灌木层和草本

层物种生态位与种间联结的研究尚未见系统报道，不利于全面掌握梭梭人工林现状及演替方向，限制了种植区域人工林恢复与重建策略的有效制定。鉴于此，本研究以阿拉善梭梭人工林林下主要植物为研究对象，采用群落调查法和生态位理论对梭梭人工林林下主要植物的生态位和种间关系进行定量研究，了解物种在群落的功能地位、生态适应性和资源利用情况，从而为梭梭人工林林下生物多样性保育及经营管理提供科学依据。

1　研究区概况和研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区最西端的阿拉善盟（北纬 37°24′～42°47′、东经 97°10′～106°51′），总面积 2.7×10^5 km^2，包括乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠。研究区气候干旱少雨、夏热冬寒，属于典型的大陆性气候。年蒸发量 3 000～4 700 mm，年均温 5.8～8.8 ℃，年均降水量 40～200 mm[30]。研究区以人工种植的梭梭为主，平均树龄 4.5 a。伴生灌木为霸王〔*Zygophyllum xanthoxylum*（Bunge）Maxim.〕、白刺（*Nitraria tangutorum* Bobrov）、沙冬青〔*Ammopiptanthus mongolicus*（Maxim. ex Kom.）S. H. Cheng〕、红砂和珍珠猪毛菜〔*Salsola passerina*（Bunge）Akhani et Roalson〕，自然恢复的草本有沙蓬〔*Agriophyllum pungens*（Vahl）Link〕、盐生草〔*Halogeton glomeratus*（M. Bieb.）C. A. Mey.〕和骆驼蓬（*Peganum harmala* Linn.）等。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置和群落调查　于 2021 年 9 月中旬对阿拉善梭梭人工林进行植物群落踏查。参照方精云等[31]的植物群落调查方法，选取长势良好、分布均匀的梭梭人工林作为典型样地，共 31 个。使用 GPS 仪记录样地的经纬度和海拔等信息，样地基本信息见表 1。每个样地沿对角线方向设 3 个面积 10 m×10 m 的灌木层样方，样方间最小间距为 5 m，记录各样方内灌木层总盖度及灌木种类、多度，使用卷尺（精度 0.1 cm）测量灌木高度、冠幅。在每个灌木层样方中，沿对角线顶端及中心位置分别设 1 个面积 1 m×1 m 的草本层样方，记录样方内草本层总盖度及草本种类、多度、盖度，使用卷尺测量草本高度。共 93 个灌木样方、279 个草本样方。

1.2.2　重要值计算　根据文献[32]中的方法计算相对盖度（RC）、相对多度（RA）、相对高度（RH），并计算重要值（IV），计算公式为 IV＝（RC＋RA＋RH）/3。基于野外调查数据，对人工林林下灌木层和草本层中重要值大于 1% 的主要植物进行生态位和种间联结分析[33]。

1.2.3　生态位分析　采用 Shannon 指数（B_S）[34]和 Levins 指数（B_L）[35]分析生态位宽度，采用 Pianka 指

表 1　内蒙古阿拉善梭梭人工林样地基本信息
Table 1　Basic information of plots of *Haloxylon ammodendron*（C. A. Mey.）Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia

样地编号 No. of plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Elevation	平均树高/m Mean height	密度/m^{-2} Density	样地编号 No. of plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Elevation	平均树高/m Mean height	密度/m^{-2} Density
P1	N39°32′51″	E105°02′38″	1 145	1.42	0.11	P17	N39°30′51″	E105°03′15″	1 208	0.75	0.12
P2	N39°34′18″	E105°05′50″	1 231	0.70	0.08	P18	N39°29′20″	E105°04′46″	1 271	0.98	0.15
P3	N41°13′13″	E104°58′54″	1 058	0.71	0.03	P19	N39°27′24″	E105°08′43″	1 147	0.60	0.15
P4	N41°19′18″	E105°02′37″	925	1.34	0.09	P20	N39°31′15″	E105°13′29″	1 135	1.21	0.15
P5	N40°46′07″	E104°26′31″	1 338	1.01	0.10	P21	N39°32′42″	E105°14′14″	1 156	0.93	0.16
P6	N40°06′22″	E104°45′01″	1 353	0.93	0.10	P22	N39°33′06″	E105°14′26″	1 159	0.31	0.18
P7	N39°20′19″	E101°13′04″	1 408	0.45	0.10	P23	N39°35′14″	E105°16′28″	1 179	1.20	0.15
P8	N39°18′30″	E101°13′21″	1 396	0.34	0.10	P24	N39°21′13″	E106°19′25″	1 376	0.97	0.16
P9	N39°18′20″	E101°09′40″	1 418	0.72	0.10	P25	N39°26′43″	E106°20′48″	1 253	0.58	0.17
P10	N39°09′45″	E101°22′37″	1 442	0.14	0.10	P26	N39°26′07″	E106°20′12″	1 253	1.34	0.16
P11	N39°48′44″	E104°23′21″	1 333	1.23	0.12	P27	N39°26′24″	E106°14′50″	1 256	0.50	0.16
P12	N39°42′44″	E104°35′21″	1 202	0.94	0.15	P28	N39°40′07″	E105°28′16″	1 047	0.48	0.16
P13	N39°38′21″	E104°43′27″	1 216	0.88	0.12	P29	N39°40′10″	E105°28′12″	1 042	0.50	0.15
P14	N39°36′04″	E104°52′10″	1 179	1.42	0.12	P30	N39°45′01″	E105°31′51″	1 018	0.40	0.16
P15	N39°33′41″	E104°58′09″	1 158	2.21	0.10	P31	N39°48′07″	E105°40′09″	980	1.34	0.16
P16	N39°31′19″	E105°01′59″	1 165	1.39	0.12						

数(O_{ik})[36]分析生态位重叠。B_S 和 B_L 值分别介于[0,ln r]和[1/r,1],r 为样方总数,B_S、B_L 的数值越大生态位越宽;O_{ik}值介于[0,1],数值越大生态位重叠度越高。

1.2.4 种间联结性分析 采用方差比率(VR)法分析灌木层和草本层植物总体联结性,采用统计量(W)检验 VR 值偏离 1 的显著程度,检验其显著性。$VR=1$,表示所有物种间无关联;$VR>1$,表示所有物种间为正联结;$VR<1$,表示所有物种间为负联结。若物种间为显著关联,则 W 未落入 χ^2 分布给出的界限概率[1,37],[38]145-146。采用 Yates 校正的 χ^2 检验物种间是否存在种间关联[39]。$\chi^2<3.841$($P>0.05$),表示种对呈不显著联结;$3.841\leqslant\chi^2\leqslant6.635$($0.01\leqslant P\leqslant0.05$),表示种对呈显著联结;$\chi^2>6.635$($P<0.01$),表示种对呈极显著联结。采用联结系数(AC)对种对的联结性进行衡量[39]。AC 值介于[-1,1],AC 值越趋向于 1,表示物种间正联结性越强;AC 值越趋向于-1,表示物种间负联结性越强;AC 值为 0,表示物种间无关联。

1.3 数据处理和分析

使用 EXCEL 2022 软件进行数据整理,使用 R4.1.2软件的 spaa 包分析生态位特征、种间联结及绘图。

2 结果和分析

2.1 生态位宽度分析

调查结果显示:内蒙古阿拉善梭梭人工林 31 块样地中共有 50 种植物,灌木层 25 种、草本层 25 种,其中,灌木层主要植物 16 种,草本层主要植物 14 种。

结果(表 2)显示:灌木层 16 个主要植物的重要值为 1.14%~18.49%,Shannon 指数和 Levins 指数分别为 0.14~2.92 和 1.06~16.55。其中,红砂的重要值、Shannon 指数和 Levins 指数均最大,白刺和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa* Maxim.)的重要值、Shannon 指数和 Levins 指数较大。表明这 3 种植物在梭梭人工林的灌木层中起主导作用。

结果(表 2)还显示:草本层 14 个主要植物的重要值为 1.11%~15.20%,Shannon 指数和 Levins 指数分别为 0.57~2.58 和 1.60~11.66。其中,骆驼蓬的重要值、Shannon 指数和 Levins 指数均最大,盐生草和雾冰藜〔*Bassia dasyphylla* (Fisch. et C. A. Mey.) Freitag et G. Kadereit〕的重要值、Shannon 指数和 Levins 指数较大。表明这 3 种植物在梭梭人工林的草本层中起主导作用。

表 2 内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层和草本层主要植物的重要值和生态位宽度[1)]

Table 2 Importance value and niche width of the main plants in the shrub and herb layers under *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia[1)]

物种 Species	IV/%	生态位宽度 Niche width	
		B_S	B_L
灌木层 Shrub layer			
红砂 *Reaumuria songarica*	18.49	2.92	16.55
白刺 *Nitraria tangutorum*	15.23	2.53	10.45
泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa*	12.13	2.45	9.57
珍珠猪毛菜 *Salsola passerine*	7.42	2.43	9.22
绵刺 *Potaninia mongolica*	7.27	2.18	5.59
霸王 *Zygophyllum xanthoxylum*	4.53	2.37	9.03
刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides*	4.16	2.16	7.28
合头藜 *Sympegma regelii*	4.10	1.57	3.98
驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides*	3.16	1.11	2.64
猫头刺 *Oxytropis aciphylla*	3.13	2.37	9.45
盐爪爪 *Kalidium foliatum*	2.79	1.42	2.96
沙木蓼 *Atraphaxis bracteata*	2.51	0.80	2.11
蓍状亚菊 *Ajania achilleoides*	2.22	0.47	1.26
柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*	1.94	0.14	1.06
松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia*	1.30	1.72	4.86
沙拐枣 *Calligonum mongolicum*	1.14	0.14	1.06
草本层 Herb layer			
骆驼蓬 *Peganum nigellastrum*	15.20	2.58	11.66
盐生草 *Halogeton glomeratus*	15.03	2.42	9.41
雾冰藜 *Bassia dasyphylla*	11.39	2.43	9.27
黄花蒿 *Artemisia annua*	10.27	2.07	5.92
碱韭 *Allium polyrhizum*	7.04	1.05	2.40
蒙古虫实 *Corispermum mongolicum*	5.58	1.73	4.01
猪毛菜 *Salsola collina*	4.57	2.17	7.53
匍根骆驼蓬 *Peganum harmala*	3.87	0.99	2.52
蒙古韭 *Allium mongolicum*	2.73	1.07	2.83
蝎虎驼蹄瓣 *Zygophyllum mucronatum*	2.29	0.83	1.60
三芒草 *Aristida adscensionis*	2.09	1.88	6.16
无芒隐子草 *Cleistogenes songorica*	1.96	1.60	3.50
砂蓝刺头 *Echinops gmelinii*	1.66	0.57	1.62
沙生针茅 *Stipa glareosa*	1.11	1.36	3.69

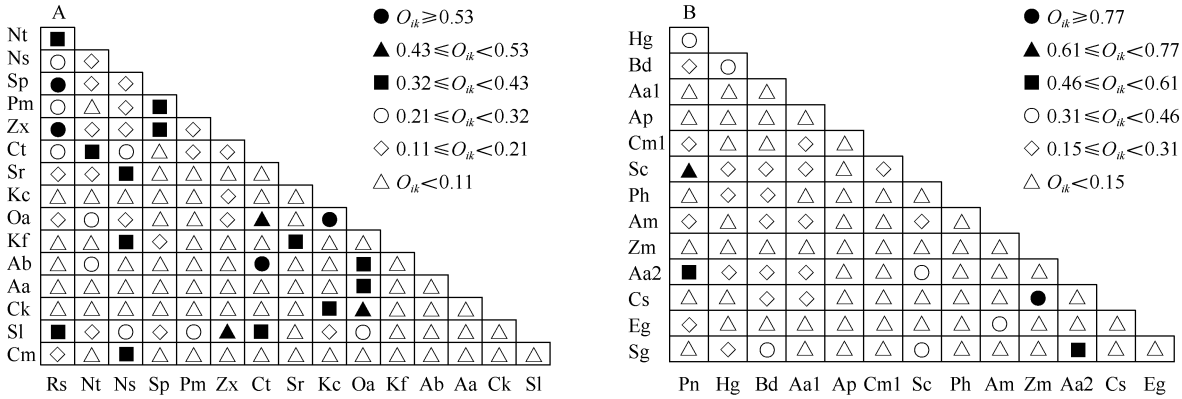
[1)] IV: 重要值 Importance value; B_S: Shannon 指数 Shannon index; B_L: Levins 指数 Levins index.

2.2 生态位重叠分析

根据 Pianka 指数(O_{ik})分析内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层和草本层主要植物的生态位重叠,结果见图 1。结果(图 1-A)显示:灌木层 16 个主要植物共组成 120 个种对,其中,$O_{ik}<0.53$ 的种对有 116 个,占总种对数的 96.7%,说明灌木层植物总体生态

位重叠较低；O_{ik}≥0.53 的种对有 4 个，占总种对数的 3.3%，分别为红砂-珍珠猪毛菜、红砂-霸王、刺旋花（*Convolvulus tragacanthoides* Turcz.）-沙木蓼（*Atraphaxis bracteata* Losinsk.）、驼绒藜〔*Krascheninnikovia ceratoides*（Linn.）Gueldenst.〕-猫头刺（*Oxytropis aciphylla* Ledeb.），说明这 4 个种对物种间的生态相似性较大。

结果（图 1-B）还显示：草本层 14 个主要植物共组成 91 个种对，其中，O_{ik}<0.77 的种对有 90 个，占总种对数的 98.9%；O_{ik}≥0.77 的种对仅 1 个，占总种对数的 1.1%，为蝎虎驼蹄瓣（*Zygophyllum mucronatum* Maxim.）-无芒隐子草〔*Cleistogenes songorica*（Roshev.）Ohwi〕。说明草木层植物总体生态位重叠较低。



Rs：红砂 *Reaumuria songarica*（Pall.）Maxim.；Nt：白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov；Ns：泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa* Maxim.；Sp：珍珠猪毛菜 *Salsola passerina* Bunge；Pm：绵刺 *Potaninia mongolica* Maxim.；Zx：霸王 *Zygophyllum xanthoxylum*（Bunge）Maxim.；Ct：刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides* Turcz.；Sr：合头藜 *Sympegma regelii* Bunge；Kc：驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides*（Linn.）Gueldenst.；Oa：猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.；Kf：盐爪爪 *Kalidium foliatum*（Pall.）Moq.；Ab：沙木蓼 *Atraphaxis bracteata* Losinsk.；Aa：蓍状亚菊 *Ajania achilleoides*（Turcz.）Poljakov ex Grubov；Ck：柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.；Sl：松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia*（Litv. ex Drobow）Akhani；Cm：沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.；Pn：匍根骆驼蓬 *Peganum nigellastrum* Bunge；Hg：盐生草 *Halogeton glomeratus*（M. Bieb.）C. A. Mey.；Bd：雾冰藜 *Bassia dasyphylla*（Fisch. C. A. Mey.）Kuntze；Aa1：黄花蒿 *Artemisia annua* Linn.；Ap：碱韭 *Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel；Cm1：蒙古虫实 *Corispermum mongolicum* Iljin；Sc：猪毛菜 *Salsola collina* Pall.；Ph：骆驼蓬 *Peganum harmala* Linn.；Am：蒙古韭 *Allium mongolicum* Regel；Zm：蝎虎驼蹄瓣 *Zygophyllum mucronatum* Maxim.；Aa2：三芒草 *Aristida adscensionis* Linn.；Cs：无芒隐子草 *Cleistogenes songorica*（Roshev.）Ohwi；Eg：砂蓝刺头 *Echinops gmelinii* Turcz.；Sg：沙生针茅 *Stipa glareosa* P. Smirn. O_{ik}：Pianka 指数 Pianka index.

图 1　内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层（A）和草本层（B）主要植物的生态位重叠

Fig. 1　Niche overlap of the main plants in the shrub（A）and herb（B）layers under *Haloxylon ammodendron*（C. A. Mey.）Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia

2.3　种间联结性分析

内蒙古阿拉善梭梭人工林林下主要植物的总体联结性分析结果表明：灌木层 16 个主要植物的方差比率（*VR*）为 0.04，表明灌木层主要植物间为负联结；*VR* 的检验统计量（*W*）为 1.42，未落入 $\chi^2_{0.95}(93)$ 与 $\chi^2_{0.05}(93)$ 的区间（75.77，114.20）内；草本层 14 个主要植物的 *VR* 值为 0.14，表明草本层主要植物间为负联结；*W* 值为 4.50，未落入 $\chi^2_{0.95}(279)$ 与 $\chi^2_{0.05}(279)$ 的区间（243.10，317.36）内。因此，阿拉善梭梭人工林林下物种总体联结性为显著负联结，群落物种间存在明显的互斥关系。

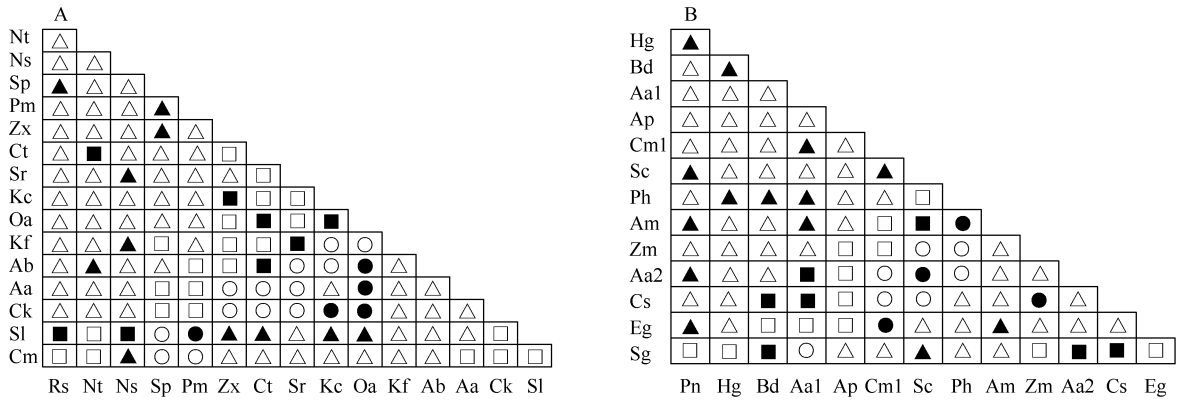
χ^2 检验结果（图 2-A）显示：灌木层 16 个主要植物形成的 120 个种对中，正联结种对有 24 个，占总种对数的 20.0%。其中，极显著正联结种对有 5 个，如绵刺（*Potaninia mongolica* Maxim.）-松叶猪毛菜（*Salsola laricifolia* Turcz. ex Litv.）、驼绒藜-柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii* Kom.）和猫头刺-沙木蓼等；显著正联结种对有 8 个，如红砂-松叶猪毛菜、白刺-刺旋花〔*Convolvulus tragacanthoides* Turcz.〕和泡泡刺-松叶猪毛菜等；不显著正联结有 11 个，如红砂-珍珠猪毛菜、白刺-沙木蓼和泡泡刺-合头藜（*Sympegma regelii* Bunge）等。负联结种对有 96 个，占总种对数的 80.0%。其中，极显著负联结种对有 13 个，如珍珠猪毛菜-松叶猪毛菜、珍珠猪毛菜-沙拐枣（*Calligonum mongolicum* Turcz.）和绵刺-沙拐枣等；显著负联结种对有 22 个，如红砂-沙拐枣、白刺-松叶猪毛菜和白刺-沙拐枣等；不显著负联结种对有 61 个，如红砂-白刺、红砂-泡泡刺、红砂-绵刺等。其

中,不显著联结种对72个,占总种对数60.0%。

χ^2 检验结果(图2-B)还显示:草本层14个主要植物形成的91个种对中,正联结种对有25个,占总种对数的27.5%。其中,极显著正联结种对有4个,如蒙古虫实(*Corispermum mongolicum* Iljin)-砂蓝刺头(*Echinops gmelinii* Turcz.)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)-三芒草(*Aristida adscensionis* Linn.)和骆驼蓬-蒙古韭(*Allium mongolicum* Regel)等;显著正联结种对有7个,如雾冰藜-无芒隐子草、雾冰藜-沙生针茅(*Stipa glareosa* P. Smirn.)和黄花蒿(*Artemisia annua* Linn.)-三芒草等;不显著正联结种对有14个,如匍根骆驼蓬(*Peganum nigellastrum* Bunge)-盐生草、匍根骆驼蓬-猪毛菜和匍根骆驼蓬-蒙古韭等。负联结种对有66个,占总种对数的72.5%。其中,极显著负联结种对有7个,如黄花蒿-沙生针茅、蒙古虫实-三芒草和蒙古虫实-无芒隐子草等;显著负联结种对有13个,如匍根骆驼蓬-沙生针茅、盐生草-沙生针茅和雾冰藜-砂蓝刺头等;不显著负联结种对有46个,如匍根骆驼蓬-雾冰藜、匍根骆驼蓬-黄花蒿和匍根骆驼蓬-碱韭(*Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel)等。其中,不显著联结种对有60个,占总种对数65.9%。

AC检验结果(图3-A)显示:灌木层16个主要植物形成的120个种对中,弱正联结($0.20<AC\leqslant 0.60$)种对有2个,占总种对数的1.7%,为泡泡刺-盐爪爪〔*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.〕和泡泡刺-沙拐枣;无联结($-0.20<AC\leqslant 0.20$)种对有30个,占总种对数的25.0%,如红砂-白刺、红砂-珍珠猪毛菜和红砂-绵刺等;弱负联结($-0.60<AC\leqslant -0.20$)种对有18个,占总种对数的15.0%,如红砂-泡泡刺、红砂-刺旋花和红砂-合头藜等;强负联结($-1.00\leqslant AC\leqslant -0.60$)种对有70个,占总种对数的58.3%,如红砂-驼绒藜、红砂-盐爪爪和红砂-沙木蓼等。

AC检验结果(图3-B)还显示:草本层14个主要植物形成的91个种对中,弱正联结种对有1个,占总种对数的1.1%,为蝎虎驼蹄瓣-无芒隐子草;无联结种对有32个,占总种对数的35.2%,如匍根骆驼蓬-盐生草、匍根骆驼蓬-雾冰藜和匍根骆驼蓬-猪毛菜等。弱负联结种对有18个,占总种对数的19.8%,如匍根骆驼蓬-蒙古虫实、匍根骆驼蓬-无芒隐子草和匍根骆驼蓬-沙生针茅等;强负联结种对有40个,

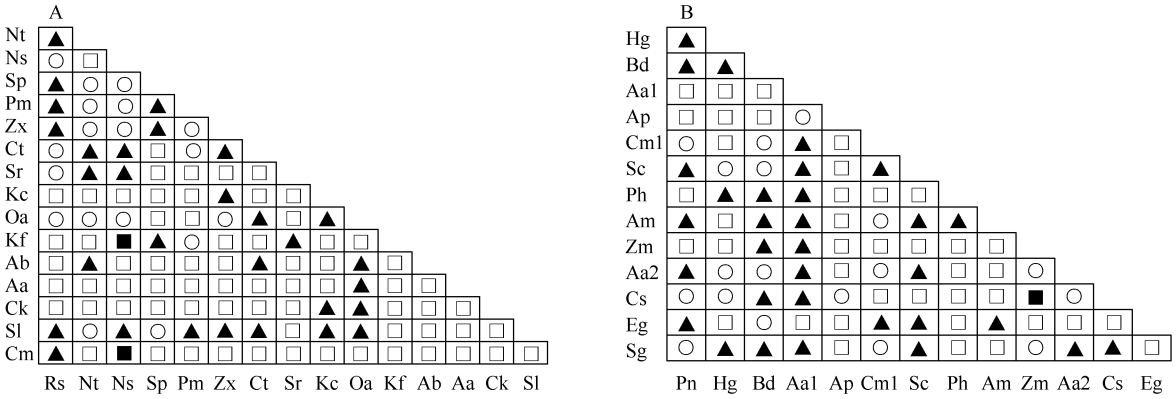


●:极显著正联结 Extremely significant positive association;■:显著正联结 Significant positive association;▲:不显著正联结 Non-significant positive association;○:极显著负联结 Extremely significant negative association;□:显著负联结 Significant negative association;△:不显著负联结 Non-significant negative association.

Rs:红砂 *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.;Nt:白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov;Ns:泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa* Maxim.;Sp:珍珠猪毛菜 *Salsola passerina* Bunge;Pm:绵刺 *Potaninia mongolica* Maxim.;Zx:霸王 *Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.;Ct:刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides* Turcz.;Sr:合头藜 *Sympegma regelii* Bunge;Kc:驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides* (Linn.) Gueldenst.;Oa:猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.;Kf:盐爪爪 *Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.;Ab:沙木蓼 *Atraphaxis bracteata* Losinsk.;Aa:蓍状亚菊 *Ajania achilleoides* (Turcz.) Poljakov ex Grubov;Ck:柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.;Sl:松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia* (Litv. ex Drobow) Akhani;Cm:沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.;Pn:匍根骆驼蓬 *Peganum nigellastrum* Bunge;Hg:盐生草 *Halogeton glomeratus* (M. Bieb.) C. A. Mey.;Bd:雾冰藜 *Bassia dasyphylla* (Fisch. C. A. Mey.) Kuntze;Aa1:黄花蒿 *Artemisia annua* Linn.;Ap:碱韭 *Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel;Cm1:蒙古虫实 *Corispermum mongolicum* Iljin;Sc:猪毛菜 *Salsola collina* Pall.;Ph:骆驼蓬 *Peganum harmala* Linn.;Am:蒙古韭 *Allium mongolicum* Regel;Zm:蝎虎驼蹄瓣 *Zygophyllum mucronatum* Maxim.;Aa2:三芒草 *Aristida adscensionis* Linn.;Cs:无芒隐子草 *Cleistogenes songorica* (Roshev.) Ohwi;Eg:砂蓝刺头 *Echinops gmelinii* Turcz.;Sg:沙生针茅 *Stipa glareosa* P. Smirn.

图2 内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层(A)和草本层(B)主要植物 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 2 Semi-matrix diagram of χ^2 test of the main plants in the shrub (A) and herb (B) layers under *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia



■：弱正联结 Weak positive association（0.20<AC≤0.60）；▲：无联结 Non-significant positive association（-0.20<AC≤0.20）；○：弱负联结 Weak negative association（-0.60<AC≤-0.20）；□：强负联结 Strong negative association（-1.00≤AC≤-0.60）.

Rs：红砂 *Reaumuria songarica*（Pall.）Maxim.；Nt：白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov；Ns：泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa* Maxim.；Sp：珍珠猪毛菜 *Salsola passerina* Bunge；Pm：绵刺 *Potaninia mongolica* Maxim.；Zx：霸王 *Zygophyllum xanthoxylum*（Bunge）Maxim.；Ct：刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides* Turcz.；Sr：合头藜 *Sympegma regelii* Bunge；Kc：驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides*（Linn.）Gueldenst.；Oa：猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.；Kf：盐爪爪 *Kalidium foliatum*（Pall.）Moq.；Ab：沙木蓼 *Atraphaxis bracteata* Losinsk.；Aa：蓍状亚菊 *Ajania achilleoides*（Turcz.）Poljakov ex Grubov；Ck：柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.；Sl：松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia*（Litv. ex Drobow）Akhani；Cm：沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.；Pn：匍根骆驼蓬 *Peganum nigellastrum* Bunge；Hg：盐生草 *Halogeton glomeratus*（M. Bieb.）C. A. Mey.；Bd：雾冰藜 *Bassia dasyphylla*（Fisch. C. A. Mey.）Kuntze；Aa1：黄花蒿 *Artemisia annua* Linn.；Ap：碱韭 *Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel；Cm1：蒙古虫实 *Corispermum mongolicum* Iljin；Sc：猪毛菜 *Salsola collina* Pall.；Ph：骆驼蓬 *Peganum harmala* Linn.；Am：蒙古韭 *Allium mongolicum* Regel；Zm：蝎虎驼蹄瓣 *Zygophyllum mucronatum* Maxim.；Aa2：三芒草 *Aristida adscensionis* Linn.；Cs：无芒隐子草 *Cleistogenes songorica*（Roshev.）Ohwi；Eg：砂蓝刺头 *Echinops gmelinii* Turcz.；Sg：沙生针茅 *Stipa glareosa* P. Smirn.

图 3　内蒙古阿拉善人工梭梭林下灌木层（A）和草本层（B）主要植物的联结系数（AC）

Fig. 3　Association coefficient（AC）of the main plants in the shrub（A）and herb（B）layers under *Haloxylon ammodendron*（C. A. Mey.）Bunge plantations in Alxa of Inner Mongolia

占总种对数的 44.0%，如匍根骆驼蓬-黄花蒿、匍根骆驼蓬-碱韭和匍根骆驼蓬-骆驼蓬等。

3　讨　　论

重要值和生态位宽度可以表征物种在群落中的地位和作用[38]160-161。本研究中，内蒙古阿拉善梭梭人工林林下灌木层中，红砂、白刺、泡泡刺均表现出较高的重要值和生态位宽度，表明这 3 种植物在灌木层中对资源的利用能力和适应环境的能力均有显著优势，对维系群落结构和稳定起着重要作用。草本层中骆驼蓬、盐生草、雾冰藜表现出较高的重要值和生态位宽度。这些一年生草本对荒漠生态系统稳定及当地畜牧业的发展有重要作用[40]。董雪等[9]对敦煌荒漠-湿地生态系统的生态位进行研究，结果表明：生态位宽度大的物种通过扩大资源利用来保证种群生存，生态位宽度小的物种趋向聚集呈小斑块状维持物种生存。本研究结果显示：梭梭人工林林下灌木层和草本层中沙拐枣、柠条锦鸡儿、砂蓝刺头、蝎虎驼蹄瓣等生态位宽度较窄，表明这些物种对环境的适应能力和种间竞争较弱，趋向于狭域种或特化种，仅能呈小斑块形式分布在适宜的生境。此外，梭梭人工林林下合头藜和碱韭重要值较大，但生态位宽度却较小，实地调查发现合头藜和碱韭在样地中占据优势，但出现频次低，导致生态位宽度小，说明这 2 种植物对环境较为敏感。

生态位重叠反映物种间对同等级共享资源利用的相似程度，以及物种间在空间配置上的共存和竞争的关系[41]。总体上看，阿拉善梭梭人工林林下多数物种的生态位重叠偏低，对资源利用的相似程度低。这可能是因为荒漠区生态环境脆弱，沙化、盐碱化现象严重，植物可利用资源匮乏[9-10]。通常生态位宽度大的物种，生态位重叠也较大[9,12]。阿拉善梭梭人工林灌木层中，生态位宽度最大的红砂组成的种对如红砂-珍珠猪毛菜、红砂-霸王的生态位重叠较高。红砂是中国荒漠区分布最广的植物，其生态可塑性和抗逆性强，成为荒漠区的优势种[42]。而猫头刺、驼绒藜等生态位宽度较小的植物出现较大的生态位重叠可能与调查区域物种稀疏、分布空间较近、发生了较大的重叠有关。在阿勒泰荒漠区草本植物[10]及柴达木

盆地东部荒漠植物[43]的生态位研究中也得出相似结果。因此,生态位宽度与生态位重叠并不是固定关系[44]。

已有研究结果[45-46]表明:植物群落演替初期,种间竞争激烈,群落种间总体关联度往往较低,甚至出现较大负关联;随着群落演替,群落结构及种类组成趋于稳定,种间总体关系也趋向正关联,这与种间竞争和淘汰密切相关;当群落演替到达顶极时,生态位分化,物种间出现明显正关联。本研究中,阿拉善梭梭人工林林下物种总体联结性为显著负联结,说明阿拉善梭梭人工林正处于动态演替的不稳定阶段,物种结构松散,未形成稳定关系。这与董雪等[9]和乌仁塔娜等[46]在荒漠区的研究结果一致。研究表明:物种间的联结主要受环境影响,偏利共生或互利共生产生正联结,竞争相同资源时相互排斥产生负联结[47]。因此,推测阿拉善梭梭人工林林下物种对微环境的需求较一致,加之环境脆弱、资源有限而产生竞争和排斥,导致种间关系为负联结。

χ^2 检验仅能做定性描述,而 AC 检验能检测出 χ^2 检验中呈不显著联结种对的联结性[20]。本研究中,χ^2 检验显示灌木层和草本层中以不显著负联结种对为主,AC 检验表明灌木层和草本层中以负联结种对占优势。说明阿拉善梭梭人工林林下主要物种间存在不同的生态适应性或种间存在竞争[20]。有研究表明:生境差异导致的负联结会出现物种间生态位重叠值低,资源竞争导致的负联结会出现物种间生态位重叠值较高[48]。阿拉善梭梭人工林林下种间联结总体为负联结,物种生态位重叠总体较低。在实际调查中,阿拉善梭梭人工林分布涉及沙漠、戈壁和荒漠等生境类型。因此,推测调查区域的生境差异可能是造成种间负联结及生态位重叠低的原因。此外,对晋西北柠条锦鸡儿人工林林下生态位特征研究发现,随着种植年限增加,林下一年生草本植物和多年生草本植物生态位宽度与生态位重叠也出现明显的增加趋势[49]。白梭梭(*Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss. et Buhse)人工林林下植被演替的研究中发现,建植时间越长恢复效果越好,植被群落结构向着有利的方向发展[50]。因此,随着人工林的生长,阿拉善梭梭人工林林下物种的生态位特征及种间关系是否会改变,还需要长期观测和进一步研究。但种间联结系数仅是对种间关联的定量描述,取样尺度、种间竞争、化感、特殊环境等均会影响种间联结性,种间联结的内在机制应从植物生理、遗传、分子等方面开展研究[20]。后续研究应深入考虑上述因子对阿拉善梭梭人工林林下植物生态位特征及种间联结的影响机制。

4 结 论

内蒙古阿拉善梭梭人工林林下红砂、白刺、泡泡刺、骆驼蓬、盐生草、雾冰藜的重要值和生态位较大,对资源的利用和环境适应能力较强,有利于维系群落的稳定。林下群落总体呈显著负联结,群落处于不稳定演替阶段。生境差异可能是造成该人工林林下灌木层和草本层物种生态位重叠低及种对呈负联结的主要原因。

参考文献:

[1] ROUSSET O, LEPART J. Positive and negative interactions at different life stages of a colonizing species (*Quercus humilis*)[J]. Journal of Ecology, 2000, 88: 401-412.

[2] BROOKER R W, MAESTRE F T, CALLAWAY R M, et al. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future[J]. Journal of Ecology, 2008, 96: 18-34

[3] DAS A, BATTLES J, STEPHENSON N L, et al. The contribution of competition to tree mortality in old-growth coniferous forests[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261: 1203-1213.

[4] MA Y X, WANG Y L, LI G T, et al. Hunshandake sand east edge of vegetation ecological niche and interspecific association studies [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 351: 012045.

[5] 郑晓阳, 赵 冲, 刘青青, 等. 成熟杉木人工林林下草本层生态位特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 332-338.

[6] 邓清雅, 温瑞龙, 王迎雪, 等. 福建大嵛山岛常绿阔叶林木本植物优势种的生态位和种间联结[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(4): 92-100.

[7] 刘萍萍, 程积民. 植物种间联结关系的研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 179-184.

[8] 黄祥童, 王绍先, 黄炳军, 等. 珍稀植物对开蕨与其伴生物种的联结性及群落稳定性[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 80-90.

[9] 董 雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 敦煌西湖荒漠-湿地生态系统优势物种生态位研究[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6841-6849.

[10] 苏金娟, 刘永萍, 刘丽燕, 等. 阿勒泰荒漠区草本植物生态位与种间关联[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2217-2228.

[11] 龚雪伟, 吕光辉. 艾比湖流域杜加依林荒漠植物群落多样性及优势种生态位[J]. 生物多样性, 2017, 25(1): 34-45.

[12] 班卫强, 严 成, 尹林克, 等. 古尔班通古特沙漠南缘不同立地条件植物多样性和优势种群生态位特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1632-1638.

[13] 王 博, 王 亮, 王立龙, 等. 濒危植物裸果木(*Gymnocarpos*

przewalskii）与其伴生种种间联结性及群落稳定性[J]. 中国沙漠，2017，37(1)：86-92.

[14] 付贵全，徐先英，徐梦莎，等. 民勤绿洲边缘两种生境红砂种群空间格局及关联性分析[J]. 干旱区地理，2016，39(1)：112-121.

[15] HARTLEY M J. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests[J]. Forest Ecology and Management，2002，155：81-95.

[16] GILLIAM F S. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems[J]. BioScience，2007，57(10)：845-858.

[17] CHÁVEZ V，MACDONALD S E. Partitioning vascular understory diversity in mixedwood boreal forests：the importance of mixed canopies for diversity conservation [J]. Forest Ecology and Management，2012，271：19-26.

[18] 占玉芳，滕玉风，甄伟玲，等. 民勤地区梭梭人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. 水土保持通报，2017，37(6)：62-67.

[19] 刘益鹏，叶兴状，叶利奇，等. 观光木群落优势树种生态位和种间联结[J]. 应用生态学报，2022，33(10)：2670-2678.

[20] 徐满厚，刘　敏，翟大彤，等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报，2016，36(24)：8224-8233.

[21] 张景波，王葆芳，郝玉光，等. 我国梭梭林地理分布和适应环境及种源变异[J]. 干旱区资源与环境，2010，24(5)：166-171.

[22] 赵　鹏，徐先英，张裕年，等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态[J]. 生态学报，2023，43(14)：6069-6079.

[23] 宝勒尔，阿丽玛，郭子俊，等. 浅谈阿拉善盟 1 亿棵梭梭种植区水资源承载力与荒漠化治理作用分析[J]. 内蒙古水利，2022(10)：18-20.

[24] 许　皓，李　彦，邹　婷，等. 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)生理与个体用水策略对降水改变的响应[J]. 生态学报，2007，27(12)：5019-5028.

[25] 马　悦. 阿拉善荒漠人工梭梭林植被变化和群落结构动态特征研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2023：17-22.

[26] 滕玉风，马　力，占玉芳，等. 河西走廊民勤人工梭梭林群落的物种多样性研究[J]. 中国水土保持，2019(1)：43-46.

[27] 陈启民，罗青红，宁虎森，等. 古尔班通古特沙漠南缘不同林龄人工梭梭林主林层和更新层特征[J]. 应用生态学报，2017，28(3)：739-747.

[28] 刘　江，张立欣，徐先英. 不同退化程度的人工梭梭林地土壤理化特征[J]. 西北林学院学报，2019，34(4)：36-42.

[29] 张　珂，苏永中，王　婷，等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. 生态学报，2016，36(11)：3235-3243.

[30] 闫瑞亚，娄安如，谢苏阳，等. 阿拉善高原荒漠植物生活型组成及其与水热因子的相关性[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2019，55(3)：349-355.

[31] 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[J]. 生物多样性，2009，17(6)：533-548.

[32] 李紫晶，莎　娜，史亚博，等. 内蒙古西鄂尔多斯地区半日花荒漠群落特征及其分类[J]. 植物生态学报，2019，43(9)：806-816.

[33] 刘益鹏，叶兴状，叶利奇，等. 观光木群落优势树种生态位和种间联结[J]. 应用生态学报，2022，33(10)：2670-2678.

[34] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell Systems Technical Journal，1948，27(4)：379-423，623-656.

[35] LEVINS R. Evolution in Changing Environments：Some Theoretical Explorations[M]. Princeton：Princeton University Press，1968：12-25.

[36] PIANKA E R. The structure of lizard communities[J]. Annual Review of Ecology and Systematics，1973，4：53-74.

[37] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations，with some example applications[J]. Ecology，1984，65(3)：998-1005.

[38] 张金屯. 数量生态学[M]. 3 版. 北京：科学出版社，2018.

[39] 王伯荪，彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究Ⅰ. 种间联结测式的探讨与修正[J]. 植物生态学与地植物学丛刊，1985，9(4)：274-285.

[40] 梁存柱，刘钟龄，朱宗元，等. 阿拉善荒漠区一年生植物层片物种多样性及其分布特征[J]. 应用生态学报，2003，14(6)：897-903.

[41] SILVERTOWN J W. The distrbution of plants in limestone pavements：tests of species interaction and niche separation against null hypotheses[J]. Journal of Ecology，1983，71(3)：819-820.

[42] 刘旻霞，南笑宁，夏素娟，等. 皋兰老虎台红砂种群在不同坡向的空间格局及关联性[J]. 干旱区地理，2019，42(6)：1359-1367.

[43] 牛慧慧，陈　辉，付　阳，等. 柴达木盆地东部荒漠植物生态位特征[J]. 生态学报，2019，39(8)：2862-2871.

[44] 张东梅，赵文智，罗维成. 荒漠草原带盐碱地优势植物生态位与种间联结[J]. 生态学杂志，2018，37(5)：1307-1315.

[45] 郭忠玲，马元丹，郑金萍，等. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究[J]. 应用生态学报，2004，15(11)：2013-2018.

[46] 乌仁塔娜，王玉霞，高润宏. 阿拉善荒漠功能灌木群分布格局[J]. 中国农学通报，2013，29(19)：79-83.

[47] KERSHAW K A. Quantitative and Dynamic Plant Ecology[M]. London：Edward Arnold，1985：115-165.

[48] 陈　旭. 长白山哈泥泥炭地七种苔藓植物种间联结和生态位研究[D]. 长春：东北师范大学，2008：24-25.

[49] 猴倩倩，刘　婧，王国华，等. 晋西北丘陵风沙区柠条林下草本植物群落组成和种群生态位变化特征[J]. 生态学报，2022，42(22)：9069-9090.

[50] 姜有为，张　恒，陶洪飞，等. 白梭梭人工林林下植被恢复的演替规律研究[J]. 新疆农业大学学报，2021，44(3)：213-222.

（责任编辑：郭严冬）