

李佳乐,陈蓓蓓,张定海.中国北方沙区固沙灌木空间点格局研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):102-112.

中国北方沙区固沙灌木空间点格局研究进展

李佳乐^a, 陈蓓蓓^b, 张定海^a

(甘肃农业大学 a.理学院, b.财经学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 利用固沙灌木的空间点格局不仅可以揭示物种的生物学特性、种内与种间关系以及环境因素对物种空间分布的影响机制,而且可以预测种群的发展趋势,为植被重建提供参考依据。当前针对沙漠生态系统,特别是中国北方沙区固沙灌木空间点格局的分布特征和规律,还缺乏系统的分析和总结,相关研究缺乏。以中国北方沙区固沙灌木为研究对象,对固沙灌木的种类、生物学特性、生态学功能进行了概述,综述了空间点格局研究中的相关统计量和零模型等重要概念,详细阐述了中国北方沙区不同类型固沙灌木的空间点格局分布特征、规律、灌木间的空间关联性及其影响因素。系统阐述我国北方沙区固沙灌木的空间点格局分布特征和关系,对于系统认识不同尺度上不同固沙灌木的种内和种间关系、在生态系统水平上提出适合中国北方沙区生态系统管理的有效途径具有重要的科学支撑意义。

关键词: 沙漠生态系统; 北方沙区; 固沙灌木; 空间点格局

文章编号: 1000-694X(2025)03-102-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00134

中图分类号: Q945

文献标志码: A

0 引言

中国北方风沙区(35°—50°N, 75°—125°E)西起塔里木盆地,东至松嫩平原,跨度约4 500 km,贯穿西北、华北和东北地区,跨越干旱至半湿润气候区,涵盖中国八大沙漠和四大沙地^[1-2]。土地荒漠化是中国的严峻生态问题,既是环境恶化的产物,又制约着区域经济发展和百姓生产^[3]。土地荒漠化导致土地生产力衰退、生态恶化、沙尘暴频发,加剧贫困问题,严重影响工农业生产和民生。风沙侵蚀威胁交通、水利及城市基础设施,成为制约中国北方山区经济社会发展的关键因素^[4]。为应对荒漠化问题,中国相继实施了“三北”防护林建设、退耕还林还草和京津风沙源治理等一系列影响重大的生态工程建设^[5-6],有效遏制了北方沙区生态环境的恶化趋势^[7-10]。构建固沙植被是改善沙区生态环境的关键措施,通过降低风速、固定流沙促进生态修复^[11],可有效防治荒漠化和风沙危害^[10]。由于沙区特殊的水热条件限制乔木生长,抗旱性强的沙生灌木成

为干旱区造林的优势物种^[12]。

植物种群的空间格局反映了个体在水平空间的分布特征,是种群生态特性、种内种间关系及环境因素共同作用的表现^[13],主要包括种群分布格局和种间关联性两个维度。前者描述种群的空间分布特征,后者揭示物种间在空间分布上的关联性^[14]。空间点格局分析作为先进的研究工具,可有效解析物种生物学特性、分布特征及其与环境相互作用的结果,检测出繁殖、竞争等生态过程留下的空间印记^[15]。因此,在防沙固沙研究中,通过确定固沙植被的空间点格局,可以揭示沙区灌木分布规律及种子传播、幼苗定居和种内种间竞争等生态过程机制^[16],评估沙区生态系统稳定性^[17],优化防风固沙配置模式。同时可指导植被恢复实践,促进植被正向演替^[18]。

当前针对沙漠生态系统固沙灌木空间点格局的分布特征和规律还缺乏系统的分析和总结,特别是针对中国北方干旱沙区固沙灌木空间点格局的相关研究相对缺乏。提出适合中国北方沙区生态

收稿日期:2025-03-28; 改回日期:2025-04-27

资助项目:国家自然科学基金项目(42361016); 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2023-07); 甘肃省科技厅重点研发计划-农业领域项目(23YFNA0036); 甘肃省科技创新计划-“西部之光”人才计划项目(22JR9KA032)

作者简介:李佳乐(2002—),女,甘肃秦安人,硕士,主要从事空间点格局方面的研究。E-mail: lijiale8935@163.com

通信作者:张定海(E-mail: zhangdh@gsau.edu.cn)

系统管理的有效途径,必须系统了解不同尺度上不同固沙灌木的空间点格局特征和固沙灌木间的种内和种间关系。本研究系统阐述北方沙区典型固沙灌木的空间分布规律、种内种间关联及其驱动因素,介绍当前空间点格局研究在理论、方法和成果等方面的进展程度与发展脉络,明确已取得的研究成果以及存在的不足,阐明关键环境因子对灌木格局形成的作用机制,为沙地生态修复提供理论依据和实践指导。

1 中国北方沙区固沙灌木概述

中国北方沙区除科尔沁沙地东部、浑善达克沙地和毛乌素沙地南缘的人工固沙植被采用榆树和杨树等乔木树种固沙以外^[19],其余沙区普遍以灌木和半灌木作为植被恢复的主要建群种。目前,分布在北方沙区的主要固沙灌木中有岩黄芪属(羊柴 *Corethroedron fruticosum* 和花棒 *Hedysarum scoparium*)、锦鸡儿属(柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*、小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla* 和中间锦鸡儿 *Caragana intermedia*)、蒿属(沙蒿 *Artemisia desertorum*、盐蒿 *Artemisia halodendron*、白沙蒿 *Artemisia sphaerocephala* 和黑沙蒿 *Artemisia ordosica*)、沙拐枣属(沙拐枣 *Calligonum mongolicum*)、梭梭属(梭梭 *Haloxylon ammodendron* 和白梭梭 *Haloxylon persicum*)、怪柳属(怪柳 *Tamarix chinensis*)、柳属(黄柳 *Salix gordejvii*)、沙冬青属(沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*)、其他属如珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)与白刺(*Nitraria tangutorum*)等^[20]。随着人工固沙植被的建成,沙地表面逐渐稳定,促进了生物土壤结皮的形成和一年生草本植物的定居。先锋物种如杨柴、沙拐枣和乌丹蒿等逐渐减退,而一些耐旱灌木如小叶锦鸡儿、梭梭、柠条和油蒿等形成稳定群落^[21]。长期演替使北方沙区固沙灌木的空间分布呈现出一些典型的格局特征。宁夏盐池地区的油蒿种群呈斑块状和条带状空间分布^[22],小叶锦鸡儿种群则更多地以灌丛化的形式存在^[23]。古尔班通古特沙漠南缘的梭梭种群呈成丛性周期分布,沙拐枣种群则为非周期性丛生^[24-25]。巴丹吉林沙漠中的白刺和梭梭种群呈斑块状连片分布^[26]。沙蒿在乌兰布和沙漠的流动沙丘上均匀分布,在固定沙丘上形成了异质性的斑块^[27]。内蒙古奈曼旗流动与半固定沙地上盐蒿种群呈群聚斑块分布^[28]。

磴口县沙冬青种群由于环境的自然间断和人为破碎化形成聚集斑块等^[29]。

中国北方沙区绝大多数固沙灌木具有显著的多重干旱生态适应性和生态功能,其对于干旱的生态适应性特点主要表现在:①根系发达。如沙拐枣的根系具有很深的主根和广延的侧根^[30],梭梭、白梭梭和锦鸡儿等灌木的根系粗壮发达^[31-32]。②抗逆性强。如沙拐枣抗风蚀、耐沙埋,可生不定根^[33],怪柳抗干旱、耐盐碱抗风蚀和沙埋^[34]。③繁殖能力良好。如锦鸡儿属植物水分充足时生长迅速^[35],沙拐枣种子具风媒传播和长期休眠特性^[33]。④独特的生理适应性。如怪柳属植物可通过泌盐排钠^[34],多数灌木采用气孔调节和渗透物质积累应对干旱^[36]。在生态功能方面,固沙灌木应具有以下的多重生态功能:①水土保持与防风固沙。固沙灌木通过枝叶降低风速,通过根系固定沙丘能够有效控制风蚀和水蚀^[37-39]。②改善土壤环境。固沙灌木凋落物分解可有效提升有机质含量,改善土壤结构并激活微生物活动^[40-41]。③维持生物多样性。固沙灌木为各类生物提供栖息环境,促进物质循环和能量流动^[42]。④调节局部气候。固沙灌木通过蒸腾作用增加空气湿度^[36]。

2 空间点格局分析概述

生态学研究的主要目标是量化和确定形成生态现象空间模式的基本过程^[43-44]。除空间点格局分析法外,其他研究方法如空间自相关分析、地统计学、物种分布模型、网络分析等^[45-52],在直接测量过程或构建实验时均遇到了一些困难^[53-54],或存在不实用^[48,55]、成本高昂和过于耗时等问题。因此,点格局分析法成为研究生态空间格局的重要选择^[56]。一方面,空间点格局既能反映历史生态过程留下的空间印记,又能预测未来生态演变趋势^[57]。其重要的意义在于可将生态模式与过程联系起来^[53,58],利用观察到的结构反映了相关的过程^[59]。另一方面,植物空间格局也是生物适应与环境筛选共同作用的结果^[58]。需要指出的是,尽管空间点格局分析具有坚实的理论背景和广泛的相关应用,但利用其在解释观察到的模式时应小心谨慎。因为相同空间格局可能源于不同生态过程^[58-59]。同样,相同生态过程在不同环境下可能形成不同格局^[56,58],即格局与过程间存在复杂的非线性关系^[60]。

2.1 空间格局的基本概念

种群空间格局是种群生态学期关注的问题,主要包含种群的空间分布格局和空间关联性。种群空间分布格局反映种群在水平空间上的分布特征,种间关联性揭示不同物种空间分布联系。种群空间格局与形成该格局的生态过程存在显著关联,通过分析分布格局可揭示物种的生态适应策略、资源利用方式及群落稳定机制^[61-62]。研究种群空间分布格局的方法众多,一般多限于单一尺度研究,如空间自相关和克里金插值等^[14]。然而,生态过程往往具有多尺度特征^[63],空间格局变化实质上是种群沿环境梯度在空间尺度上的连续响应^[62-64]。点格局分析法突破尺度限制,可全面解析种群空间分布特征^[13]。该方法被引入国内后,广泛应用于森林、草地、荒漠等各类生态系统中的种群格局研究^[15,65],为揭示植物资源利用策略和群落构建机制提供了重要工具^[13]。

2.2 常用空间点格局统计量和零模型

常用统计量可细分为一阶统计、二阶统计、高阶统计和近邻统计。一阶统计研究点模式的强度 λ 及其在大尺度上的变化^[59],包括克拉克指数和埃文斯指数等指数。二阶统计是依赖于距离变量 r 的函数,用于测量所有以 r 为距离的点对之间的相关性。在单变量分析中,二阶统计只涉及一种模式(如一个物种、一个大小或年龄等级、一个生命阶段等),而在双变量版本中,研究两种模式。常见的二阶统计量包括 $K(r)$ ^[66]、 $L(r)$ ^[66]、成对相关函数 $g(r)$ ^[67]、环统计量 $O(r)$ ^[59]、 K_2 指数^[68]及在其基础上延伸的统计量,定性标记模式中使用的标记连接函数 $P_{ij}(r)$ 等^[68-69],定量标记模式中使用的标记相关函数 $K_{m1m2}(r)$ 等^[67]。高阶统计一般较少使用^[58]。近邻统计可细分为近邻分布函数 $D^k(r)$ 和球面接触分布 $H_s(r)$ 等^[59]。

零模型通常被看作模式生成模型,建立在没有特定生态机制的情况下所预期的模式,常被用来检验由相同生态机制产生的数据^[70],目的是找出数据中是否存在零模型中不存在的结构。如果观测到的数据与零模型有明显偏离,则可视为对生态假说的支持。在无标记的单变量分析中,完全空间随机(CSR)零模型是迄今为止生态学家使用最多的模型^[71],可确定模式是否包含可与纯随机效应区分开来的空间结构^[58];异质泊松模型(HP)可以将环境依

赖性的影响与点相互作用的影响明确分开^[58];泊松聚类过程产生聚类,多代扩展就是嵌套双聚块模型^[69];COX过程是一类广泛的点过程模型,是异质泊松过程的扩展;硬核点模式与吉尼斯过程都可以产生超分散模式^[69]。双变量中由于每个单变量分量模式都可能具有复杂的空间结构,不一定显示真正的相互作用。因此,必须以单变量结构为条件来探讨相互作用。检验两种模式独立性可以选择环形移动法,保持第一种模式不变,并以保留其单变量结构重要特征的方式随机化第二种模式,也可以使用非参数模式重构技术^[72]。可以利用有共同父母或有部分共同父母的双变量托马斯过程描述正交互作用,利用双变量吉布斯过程描述负交互作用;考虑异质性则可以使用双变量异质泊松过程。对于定性标记点格局采用随机标记的零模型,必须区分定性标记模式和双变量模式。在定性标记模式中,一个给定的单变量模式是由后验过程标记的;在双变量模式中,两套不同的先验过程产生了两个组成模式。对于定量标记点模式,单变量模式零模型由独立标记给出。双变量概括有3种,有两个定量标记或一个定性标记与定量标记的单变量模式的空模型会随机改变其中一个标记,固定另一个标记,具有一个定量标记的双变量模式只对一个模式进行独立标记,而另一个“先验”模式的标记保持不变。零模型是减少假阳性的关键因素^[73],其选取需基于对生态系统与统计因素的深入认知^[74]。目前几乎没有用于检验生态空模型稳健性的指南^[75-76]。研究趋势正从单一假设检验转向多假设比较^[55]。当然,有关零模型的使用还存在一些争议,主要是难以确定特定过程与格局的因果关系^[77-78],使用的零假设过于简单以及在零模型使用过程中存在错误,如未适当考虑异质性^[79]。大多数研究都没有充分利用现代点格局分析的潜力。目前国内空间点格局研究多集中于应用层面,在方法创新和工具开发方面相对薄弱^[80-82]。

3 中国北方沙区固沙灌木的空间点格局研究进展

3.1 点格局的分布特征研究进展

3.1.1 种群的龄级分布

种群龄级分布格局是反映形成种群分布格局过程的重要线索^[83],可揭示种群与环境互作机制,

暗示了种群发展状态与未来趋势^[84-85]。增长型种群通常呈现反“J”字型或正金字塔型,意味着可通过大量繁殖幼株来维持种群稳定性;稳定型种群表现为两头低中间高的金字塔型,表明生长适应性良好;衰退型意味着种群更新出现问题。一般而言,种群中幼龄个体多呈聚集分布以优化资源获取,成龄个体因竞争产生自疏作用,分布格局趋于随机化。因此固沙灌木的空间格局主要受幼龄个体分布主导,较大龄级主要影响空间分布格局的波动性^[86-88]。生物特性及环境异质性都会对不同龄级的空间分布格局产生影响^[83]。石羊河下游荒漠-绿洲交错带沙拐枣种群属于增长型种群,这是因为在环境较好的绿洲边缘中沙拐枣种群林龄较小^[89]。白梭梭种群在古尔班通古特沙漠属于稳定型^[90],而在甘家湖为增长型^[91]。梭梭在民勤县荒漠区与绿洲荒漠过渡带内均呈正金字塔型结构^[92-93],幼龄的高死亡率可能与幼苗对环境压力的适应性较弱有关^[93]。而梭梭在古尔班通古特沙漠与乌兰布和沙漠均为增长型种群^[49],但在乌兰布和沙漠各邻级存在较大波动,这与降水的不稳定有关^[94-95]。不同生境条件下的沙冬青种群结构有差异^[29],大多数研究显示其种群呈下降型或稳定型^[96-98]。因为非人工干预条件下沙冬青只能进行有性繁殖,而种子对环境耐受性差,萌发条件较为苛刻^[99-101]。但在东阿拉善荒漠上,增长型、稳定型和衰退型沙冬青种群在空间上交错分布^[98],景泰县北碓山沙冬青种群则较稳定,且在阳坡中部为增长型^[102]。荒漠锦鸡儿种群在甘肃皋兰县老虎台属增长型种群,更新状况较好^[103]。黑沙蒿在宁夏荒漠草原基本属于稳定型种群,但幼龄偏少。盐蒿在科尔沁沙地呈金字塔型,种群有衰退的趋势。科尔沁沙地的白沙蒿,由于没有黑沙蒿的存在,在该地区占据优势生态位,且在固定沙地仍然生长良好,不过从年均结构分析看,已开始衰退^[104]。在阿拉善高原与内蒙古荒漠区,珍珠猪毛菜种群年龄结构主要呈现稳定型结构,其次是增长型,这可能与生境资源均匀分布,成年个体抗逆能力较强有关^[105-107]。

3.1.2 种群的空间分布格局

种群空间分布格局可分为聚集分布、均匀分布和随机分布^[15,63]。中国北方沙区固沙灌木的空间分布格局具有显著尺度特征:小尺度多呈聚集分布,随尺度增大逐渐向随机分布过渡。种子扩散受限和严酷的沙漠环境使幼苗聚集来促进存活和种群

建立,随个体生长资源竞争加剧,自疏与他疏促使分布趋于随机^[14]。

乌兰布和沙漠东北边缘花棒种群幼龄表现为集群分布,而成树则呈随机分布。这主要由花棒较强的无性繁殖能力决定。同时相比于其他沙丘,固定沙丘更适宜花棒生存和扩大其种群分布范围^[108]。沙拐枣种群在民勤和石羊河的荒漠-绿洲交错带均呈现聚集分布格局^[109-110],这可能因为沙拐枣种群萌蘖能力很强且研究区域异质性较高^[89]。白刺灌丛沙堆在民勤荒漠绿洲过渡区呈现聚集分布,而荒漠区及绿洲区均呈随机分布,可能主要可归因于其边界效应^[111-112]。在巴音温都尔沙漠,白刺种群为适应放牧干扰导致的生境异质性,在小尺度上表现出聚集分布特征,但适度的放牧活动对其空间格局影响有限^[113]。不同沙漠地区的梭梭属植物呈现相似的空间分布规律。古尔班通古特沙漠的白梭梭和梭梭种群整体呈聚集分布^[62],甘家湖也呈现同样特点但聚集强度随龄级增长而减弱^[65,91]。乌兰布和沙漠的梭梭种群因生境异质性主要呈现聚集分布,少数样地为均匀分布^[95]。民勤绿洲边缘的梭梭种群从绿洲到沙漠均保持稳定的聚集格局^[93]。这种分布特征主要受生境异质性、种子扩散限制和种内竞争共同影响^[95,114]。在东阿拉善,沙冬青种群的分布与一般灌木分布规律相一致^[98],为小尺度上聚集,在中等和较大尺度上随机的空间格局。但在磴口县,幼龄和老龄沙冬青植株均呈随机分布,中龄植株呈聚集分布。这可能是沙冬青特殊的生物学特性和环境因子共同作用的结果^[29,99]。在浑善达克沙地、内蒙古四子王旗中部、锡盟草原与荒漠区以及西鄂尔多斯^[35,83,115],锦鸡儿表现出明显的小聚集、大分散特点,形成沙地最为多见的簇丛状分布格局。这是因为风成种子在母树周围集中分布^[116],土壤分布的异质性又使灌丛下土壤聚集形成“沃岛”^[117-118]。进一步,在沙地坡中及坡下部位,小叶锦鸡儿种群在小尺度上表现为均匀或随机分布;在坡上及平地部位,小叶锦鸡儿种群在小尺度上呈现高度聚集分布。这是因为坡位对降水、养分等自然资源再分配,而平地蒸发量大且受人为干扰的程度最强^[115]。甘肃皋兰县老虎台不同坡向的荒漠锦鸡儿分布也说明了不同坡向通过光照和水分等的胁迫及其他物种竞争来影响锦鸡儿的格局^[103]。沙蒿种群的空间格局与其生境有重要联系^[119-120]。在毛乌素固定沙地,黑沙蒿主要呈现高度聚集分布,存活和死亡

黑沙蒿两者之间表现为高度竞争的关系,而固定沙地中黑沙蒿均表现为均匀或者随机分布,存活与死亡两者之间不存在竞争。这是因为水分是黑沙蒿种群生长与分布的主要限制因素^[121-122]。宁夏荒漠草原也呈现同样的规律,固定沙地上沙埋风蚀作用较弱,加之结皮的影响,黑沙蒿种群由均匀向随机分布过渡^[123]。宁夏中卫市沙坡头、甘肃古浪县鸣沙咀和民勤县扎子沟各黑沙蒿种群分布格局类型也为聚集分布,但是各样地聚集度存在差异。半固定沙地的黑沙蒿种群空间分布的聚集强度最大。这是因为半固定沙地缺乏土壤生物结皮,地表风沙流严重^[124-125],使幼苗生长受到抑制甚至死亡^[126-127]。只有形成聚集性较强的斑块才能削弱风沙流,增加存活机会^[128-129]。随着科尔沁沙地的固定,草本植物增加,盐蒿优势度明显下降,从聚集分布变为随机分布^[130]。这是因为盐蒿以根茎无性繁殖为主,流动沙地促进了无性繁殖^[28]。同时幼体的聚集生长有利于成活^[129]。

3.2 空间关联性研究进展

空间关联性可以揭示植物种内不同株丛级以及种间相互依存和相互制约的复杂关系^[15,131]。不仅可以揭示静态分布格局,还能揭示演替的过程。例如,幼苗与成株的负关联可能随年龄增长逐渐减弱,表明竞争压力随时间缓解^[98]。此外,结合环境因子的空间关联分析,可区分生物互作与环境筛选的相对贡献,为群落组装机理研究提供多维证据^[132]。

3.2.1 种内不同生长发育阶段之间的相关关系

种群龄级间的空间关联性能有效反映不同阶段生态适应策略和种内相互作用关系^[83,87],主要表现为正关联(互利)、负关联(竞争)和无关联(独立)^[133],且与种群的空间分布格局密切相关^[134]。当不同龄级个体无关联时,种群多呈现随机或均匀分布,这种格局有助于减少资源竞争压力^[134-136]。种群龄级之间的空间关联性与年龄结构和种内相互作用具有很大关系。龄级差异越大,正关联性越弱甚至转为负关联,这主要源于非对称竞争作用;而相近龄级的个体则多表现为聚集分布和显著正关联^[83]。植株个体大小与生长发育阶段类似于龄级差别,会影响种群的空间关联性^[34,133]。

种群的空间关联性具有明显的尺度依赖性特征。一般而言,空间正负关联主要发生在小尺度范

围内,随着研究尺度会逐渐减小^[15,133]。种内在较大尺度范围内没有明显的排斥竞争的现象,这可能是由于同种个体具有相似的生态位需求,有利于互利共存^[137]。另一方面,径级较小的植株对于资源竞争能力较弱^[134],通过聚集分布形成群体效应^[138],大径级植株在一定范围内对生境的改变庇护小植株,提高资源利用效率^[134]。

在民勤荒漠绿洲过渡带,白刺在小尺度上表现出小沙堆间的正关联性逐渐增强,而在中大尺度上中大沙堆表现出负关联加强或无关联。这是因为干旱胁迫引发的水分竞争,白刺发达的根系系统形成地上-地下互馈作用^[139]。在毛乌素固定沙地与民勤荒漠绿洲过渡带,生物结皮的存在强化了沙堆间对水分的竞争^[140],导致正关联减弱而负关联增强^[141]。白梭梭种群林龄差距越大,个体间空间正关联性越强;梭梭种群则相反。这说明白梭梭种群通过成株-幼株的庇护关系应对干旱胁迫,而梭梭种群则通过龄级聚集增强资源竞争能力,这种差异导致梭梭成株对幼株产生更强的抑制作用^[62,142-143]。沙冬青种群的空间关联性呈现明显的生境依赖性特征。在西鄂尔多斯干旱区,沙冬青个体间多表现为正关联,形成互利庇护关系以应对水分胁迫^[144-145]。在宁夏沙湖砾质沙地生境中面临更为严重的干旱胁迫,然而由于根系对水分的激烈竞争,正相互作用也仅存在于一定的尺度范围内^[146]。此外,受天然更新障碍和人为干扰影响,西鄂尔多斯沙冬青中龄与老龄个体间呈现负关联,反映出该物种的生存压力和发展困境^[99]。在浑善达克沙地干旱、半干旱区不同的坡位,由于资源限制加之形成的灌丛化沙包会产生肥岛效应导致资源不对等性,小叶锦鸡儿大苗与幼苗几乎都表现为负相关^[23]。而在资源均质的浑善达克沙地平地上因无性繁殖形成了小尺度正相关庇护生长^[115]。在内蒙古草原与荒漠区土壤质地不同锦鸡儿的种间关系有一定影响。在沙质土上多呈无关联,而在砂砾质土上则因浅层根系竞争表现为负相关^[35]。在浑善达克沙地丘间低地榆树和小叶锦鸡儿小中尺度呈正负关联交替,其他尺度上无关联。小叶锦鸡儿与榆树相比,资源竞争能力不足,加之乔木遮阴影响林下植被的分布格局,所以灌木与榆树镶嵌分布在丘间低地中,这是二者长期相互适应的结果,通过资源分配实现长期共存^[116]。黑沙蒿种群的空间关联性呈现明显的龄级分化特征:幼龄与老龄个体关联性较

强,这与其兼具无性和有性繁殖的特性相关^[147],但相邻发育阶段间的关联性随种群发育逐渐减弱^[148]。不同立地条件下存活与死亡个体的空间关系差异显著,毛乌素半固定沙地表现为因死亡个体释放资源呈现小尺度正关联(死亡个体释放资源),而固定沙地则因资源竞争呈现负关联^[132]。类似地,科尔沁沙地盐蒿种群的空间关联性表现为相邻龄级关系不显著,而间隔龄级呈负相关,这与幼体聚集、成体随机的分布格局相符^[129]。这种关联性受生境条件调节,在科尔沁沙地半固定沙丘上各龄级的盐蒿间的正相关性较流动沙丘强^[14]。在石羊河中游河岸,沙蒿种群的关联模式呈现水分梯度变化:近河道区域形体差异大的个体呈正关联,远河道区域则形体相近个体呈负关联,反映出水分有效性对种群结构的调控作用^[149]。珍珠猪毛菜通常以种子繁殖,由于扩散限制通常一定的尺度下成熟之珠与幼株表现为空间正关联现象^[107,150]。空间关联性呈现明显的环境梯度变化。在内蒙古草原化荒漠地区随干旱程度增加,珍珠猪毛菜种群内部的生态关系逐渐减弱^[151]。在阿拉善高原较干旱地区,珍珠猪毛菜整体上表现为无关联;在生境较好地区,其空间关联性复杂程度较高,随尺度增大由正关联转变为无关联与负关联。放牧过程中对中对龄植株的采食,可以增加幼级植株资源竞争力,降低正关联作用^[105]。

3.2.2 种间关联性

种群间的相关关系分为正关联、负关联及无关联^[15],通常是在多种因素的共同作用下种群适应环境的结果^[134,152]。负相关性主要源生态位差异导致的资源利用分化与同质资源竞争引发的竞争排斥^[153]。通常小尺度竞争排斥作用导致种群之间呈现出负相关关系,但随着尺度增大,逐渐呈现出随机或均匀分布,种群的空间分离格局降低了种群的相遇几率,同时生存所需的空间和资源竞争减弱,因此最终呈现出无关联关系的稳定状态^[134]。

鄂尔多斯高原沙漠-河岸过渡带上的雾冰藜与白刺沙堆在小尺度上表现为正相关,这种互利关系源于白刺沙堆形成的微地形为雾冰藜提供了适宜的沙质基质和水分条件,而雾冰藜的密集生长通过根系固沙,且其凋落物分解显著提升了沙堆表层土壤有机质。即白刺沙堆的发育促进雾冰藜种群建立,而雾冰藜的生长又反过来优化了白刺的立地条件^[154]。

在古尔班通古特沙漠,白梭梭和梭梭种群在研究尺度内呈负关联且随空间尺度增大负相关性增强,这种竞争关系主要源于二者对土壤养分和水分需求高度重叠^[155-156],进而激烈竞争相互抑制。可能是因为冠层郁闭影响幼株的发育^[157],成龄株对种间幼株产生负反馈。竞争与抑制强度随个体发育阶段变化,后逐渐减弱演替为无相关与正相关^[62]。

4 结论与展望

阐明中国北方沙区固沙灌木的空间点格局分布特征、规律以及固沙灌木的空间关联性对理解该地区固沙灌木种群的生态过程与其生境之间的关系具有重要的科学意义。本文对中国北方沙区固沙灌木的种类、生物学特性、生态学功能进行了简要概括,综述了空间点格局研究中的统计量和零模型,详细阐述了中国北方沙区不同类型固沙灌木的空间分布特征、规律、灌木间的空间关联性及其影响因素。

未来研究可从以下几个方面展开:①当前研究多局限于单一区域或小尺度范围,未来应结合遥感、无人机航测和地面调查,开展多点位、多尺度的系统观测,以揭示固沙灌木空间分布的分布规律。且现有研究多聚焦于单一物种,未来应加强种间空间关联性分析,探讨竞争、促进或中性作用在群落组装中的相对重要性,并引入功能性状分析,揭示物种共存机制。②固沙灌木的分布与研究区特定的水文过程密切相关。未来可结合长期的生态水文过程监测及模型模拟,量化生态水文过程对灌木空间格局的塑造作用,并探索二者互馈互调机制。③国内研究一般通过多次蒙特卡洛模拟计算每个零模型在不同距离 r 下的统计量值,并构建95%模拟包络线。但这些模拟包络线不能直接等同于置信区间,因为零假设是在多个尺度上同时检验的,这可能导致I类错误膨胀。因此,建议采用拟合优度(GOF)检验来基于 u 统计量评估各模型的整体拟合效果,也可结合机器学习、贝叶斯层次模型等新方法,提高空间分析的精度和解释力。④基于空间格局研究,构建格局-过程-功能一体化研究框架,可优化固沙灌木的配置模式,提出针对不同沙区环境的植被恢复方案,为中国北方沙区生态系统的精准保护和可持续恢复提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 朱震达,刘恕.我国北方地区沙漠化过程及其治理区划[J].中国沙漠,1981,1(1):1-16.
- [2] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(增刊1):397-410.
- [3] 陈文阳.新中国甘肃省沙漠化治理研究[D].兰州:西北民族大学,2024.
- [4] 刘拓.中国土地沙漠化及其防治策略研究[D].北京:北京林业大学,2005.
- [5] Grebner D L, Bettinger P, Siry J P, et al. Introduction to Forestry and Natural Resources [M]. Pittsburgh, USA: Academic Press, 2021: 30-38.
- [6] Qiu B W, Chen G, Tang Z H, et al. Assessing the Three-North Shelter Forest Program in China by a novel framework for characterizing vegetation changes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 133: 75-88.
- [7] 赵文智,李秋艳,常学向.我国北方沙漠化生态系统修复案例[J].中国水利,2004(10):35-39.
- [8] 王涛,赵哈林.中国沙漠科学的五十年[J].中国沙漠,2005,25(2):3-23.
- [9] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].中国科学院院刊,2017,32(7):790-797.
- [10] 张举涛.中国北方典型沙区植被承载力研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [11] 高岩.1990-2015年中国北方四大沙地典型植被覆被格局变化及其影响因子[D].北京:北京林业大学,2019.
- [12] 王甜甜,朱林,赵学琳,等.三种典型固沙灌木的降雨再分配特征[J].干旱区资源与环境,2021,35(8):100-107.
- [13] 许爱云,刘金龙,米世明,等.宁夏荒漠草原蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)种群小尺度空间分布及其关联性[J].生态学报,2019,39(12):4551-4559.
- [14] 李苏,张定海,张志山,等.科尔沁沙地盐蒿种群的空间分布格局及关联性[J].生物资源,2022,44(1):63-72.
- [15] 刘万龙.异质生境下荒漠草原蒙古冰草群落特征及种群分布格局[D].银川:宁夏大学,2022.
- [16] Bah I F, 张定海,孙琰蕙,等.古尔班通古特沙漠东部三种沙丘上优势灌木的空间格局及种间关联性研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(7):154-165.
- [17] 杨瑞红.古尔班通古特沙漠梭梭种群及群落动态特征和稳定性评价[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2017.
- [18] 王志韬.不同降水条件下沙漠种群空间格局及对流沙治理的启示[D].兰州:西北师范大学,2023.
- [19] 焦树仁,李春龙,王宝泽,等.彰武沙地水利改良与利用研究[J].防护林科技,2015(1):52-55.
- [20] 孙姗姗,刘新平,何玉惠,等.我国固沙植物资源化利用研究进展[J].世界林业研究,2020,33(6):74-79.
- [21] 张定海,李新荣,张鹏.生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J].中国沙漠,2017,37(4):678-688.
- [22] 刘建康,冯湘,张克斌,等.荒漠草原优势种群油蒿空间分布格局对封育恢复的响应[J].应用生态学报,2022,33(3):720-726.
- [23] 初玉,杨慧玲,朱选伟,等.浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间异质性[J].生态学报,2005,25(12):3294-3300.
- [24] 吴改艳,张定海,张志山,等.古尔班通古特沙漠半固定沙丘上固沙灌木的空间结构特征研究[J].草地学报,2024,32(7):2190-2204.
- [25] 赵一之.小叶、中间和柠条三种锦鸡儿的分布式样及其生态适应[J].生态学报,2005,25(12):3411-3414.
- [26] 姜亚东,吕世杰,刘红梅,等.巴丹吉林沙漠东缘主要灌木数量特征及空间分布[J].中国沙漠,2023,43(3):295-304.
- [27] 马全林,郑庆中,贾举杰,等.乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征[J].生态学报,2012,32(11):3423-3431.
- [28] 潮洛蒙,朴顺姬,智瑞年,等.不同类型沙地中差不嘎蒿种群分布格局的研究[J].中国沙漠,1999,19(增刊1):46-49.
- [29] 何恒斌,张惠娟,贾桂霞.磴口县沙冬青种群结构和空间分布格局的研究[J].林业科学,2006,42(10):13-18.
- [30] 刘建泉.沙拐枣群落特征与生态学特性的研究[J].甘肃林业科技,1995(2):18-22.
- [31] 岳跃蒙,李晨华,徐柱,等.古尔班通古特沙漠降雨过程中梭梭与白梭梭冠层养分的变化特征[J].干旱区研究,2020,37(5):1293-1300.
- [32] 李中赫,刘彤.古尔班通古特沙漠西部退化梭梭群落多样性与土壤理化性质的关系[J].应用与环境生物学报,2018,24(5):1165-1170.
- [33] 苏培玺,周紫鹃,张海娜,等.荒漠植物沙拐枣群体光合作用及土壤呼吸研究[J].北京林业大学学报,2013,35(3):56-64.
- [34] 康佳鹏,韩路.塔河源荒漠河岸林灰胡杨与多枝柽柳种群空间格局与空间关联性[J].中南林业科技大学学报,2021,41(2):123-132.
- [35] 李政海.内蒙古草原与荒漠区几种锦鸡儿种群格局的研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),1995,26(1):67-74.
- [36] 徐先英,孙保平,丁国栋,等.干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J].生态学报,2008,28(3):895-905.
- [37] 蒋齐,李生宝,翟明普.我国的固沙型灌木林及其研究进展[J].干旱区资源与环境,1998,12(2):88-96.
- [38] 傅伯杰,刘焱序,王帅,等.科学改善荒漠化地区人与自然关系[J].中国科学院院刊,2024,39(12):2027-2036.
- [39] 马全林,卢琦,张德魁,等.沙蒿与油蒿灌丛的防风阻沙作用[J].生态学杂志,2012,31(7):1639-1645.
- [40] 李海泉.不同固沙灌木配置模式对宁夏沙地草本植被和土壤特征的影响[D].银川:宁夏大学,2021.
- [41] 汪万福,王涛,李最雄,等.敦煌莫高窟崖顶灌木林带防风固沙效应[J].生态学报,2004,24(11):2492-2500.
- [42] 张雷.毛乌素沙地人工灌木林群落特征及其生态系统服务研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2021.
- [43] Tilman D, Kareiva P. Spatial Ecology: the Role of Space in Population Dynamics and Interspecific Interactions [M]. Princeton

- University Press, 1997: 50–57.
- [44] Tuda M. Understanding mechanism of spatial ecological phenomena; a preface to the special feature on “spatial statistics” [J]. *Ecological Research*, 2007, 22: 183–184.
- [45] Kikvidze Z, Pugnaire F, Brooker R W, et al. Linking patterns and processes in alpine plant communities: a global study [J]. *Ecology*, 2005, 86(6): 1395–1400.
- [46] McIntire E J, Hik D S. Influences of chronic and current season grazing by collared pikas on above-ground biomass and species richness in subarctic alpine meadows [J]. *Oecologia*, 2005, 145(2): 287–296.
- [47] Turchin P. *Quantitative Analysis of Movement: Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants* [M]. Sunderland, USA: Sinauer Associates, 1998: 70–78.
- [48] Law R, Illian J, Burslem D F, et al. Ecological information from spatial patterns of plants: insights from point process theory [J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(4): 616–628.
- [49] Dale M R, Fortin M J. *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014: 68–74.
- [50] McIntire E J, Schultz C B, Crone E E. Designing a network for butterfly habitat restoration: where individuals, populations and landscapes interact [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(4): 725–736.
- [51] Broquet T, Ray N, Petit E, et al. Genetic isolation by distance and landscape connectivity in the American marten (*Martes americana*) [J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 877–889.
- [52] Fajardo A, McIntire E J. Distinguishing microsite and competition processes in tree growth dynamics: an a priori spatial modeling approach [J]. *The American Naturalist*, 2007, 169(5): 647–661.
- [53] Jolles A E, Sullivan P, Alker A P, et al. Disease transmission of aspergillosis in sea fans: inferring process from spatial pattern [J]. *Ecology*, 2002, 83(9): 2373–2388.
- [54] Clark J S. *Models for Ecological Data: an Introduction* [M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2007: 40–48.
- [55] McIntire E J, Fajardo A. Beyond description: the active and effective way to infer processes from spatial patterns [J]. *Ecology*, 2009, 90(1): 46–56.
- [56] Perry G L, Miller B P, Enright N J. A comparison of methods for the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology [J]. *Plant Ecology*, 2006, 187: 59–82.
- [57] Velázquez E, Marcelino De I C, Gomez-Sal A. Changes in spatial point patterns of pioneer woody plants across a large tropical landslide [J]. *Acta Oecologica*, 2014, 61: 9–18.
- [58] Ben-Said M. Spatial point-pattern analysis as a powerful tool in identifying pattern-process relationships in plant ecology: an updated review [J]. *Ecological Processes*, 2021, 10: 1–23.
- [59] Wiegand T. Introduction to point pattern analysis with Ripley's L and the O-ring statistic using the Programita software [J]. *Department of Ecological Modelling, UFZ-Centre of Environmental Research, Leipzig*, 2004: 25–36.
- [60] Moloney K A. Determining Process through Pattern: Reality or Fantasy? [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 1993: 61–69.
- [61] He F L, Duncan R P. Density-dependent effects on tree survival in an old-growth Douglas fir forest [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88(4): 676–688.
- [62] 王雅婷, 张定海, 张志山. 古尔班通古特沙漠固定沙丘上白梭梭和梭梭的空间分布及种间关联性 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(3): 27–38.
- [63] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology: the Robert H. MacArthur award lecture [J]. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943–1967.
- [64] Zheng L, Zhen Q L. Fine-scale spatial pattern of *Artemisia frigida* population under different grazing intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 227–234.
- [65] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 57–62.
- [66] Ripley B D. Modelling spatial patterns [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1977, 39(2): 172–192.
- [67] Stoyan D, Stoyan H. *Fractals, Random Shapes and Point Fields: Methods of Geometrical Statistics* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.
- [68] Schiffers K, Schurr F M, Tielbörger K, et al. Dealing with virtual aggregation: a new index for analysing heterogeneous point patterns [J]. *Ecography*, 2008, 31(5): 545–555.
- [69] Illian J, Penttinen A, Stoyan H, et al. *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2008: 70–75.
- [70] Gotelli N J, Ellison A M. *A Primer of Ecological Statistics* [M]. Sunderland, USA: Sinauer Associates, 2004: 8–15.
- [71] Velázquez E, Martínez I, Getzin S, et al. An evaluation of the state of spatial point pattern analysis in ecology [J]. *Ecography*, 2016, 39(11): 1042–1055.
- [72] Lotwick H W, Silverman B W. Methods for analysing spatial processes of several types of points [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 1982, 44(3): 406–413.
- [73] Miller E T, Farine D R, Trisos C H. Phylogenetic community structure metrics and null models: a review with new methods and software [J]. *Ecography*, 2017, 40(4): 461–477.
- [74] Gotelli N J. Null model analysis of species co-occurrence patterns [J]. *Ecology*, 2000, 81(9): 2606–2621.
- [75] Ladau J. Validation of null model tests using Neyman-Pearson hypothesis testing theory [J]. *Theoretical Ecology*, 2008, 1: 241–248.
- [76] Ladau J, Schwager S J. Robust hypothesis tests for independence in community assembly [J]. *Journal of Mathematical Biology*, 2008, 57(4): 537–555.
- [77] Connor E F, Simberloff D. Interspecific competition and species co-occurrence patterns on islands: null models and the evalua-

- tion of evidence[J]. *Oikos*, 1983; 455–465.
- [78] Zhang M J. The use and limitations of null-model-based hypothesis testing[J]. *Biology & Philosophy*, 2020, 35(2): 31.
- [79] Molina C, Stone L. Difficulties in benchmarking ecological null models: an assessment of current methods[J]. *Ecology*, 2020, 101(3): e02945.
- [80] 沈志强, 卢杰, 华敏, 等. 2004–2013年我国空间格局分析的方法: 点格局分析法研究文献分析[J]. *北方园艺*, 2015(11): 197–200.
- [81] 李明辉, 何风华, 刘云, 等. 林分空间格局的研究方法[J]. *生态科学*, 2003, 22(1): 77–81.
- [82] 兰国玉, 雷瑞德. 植物种群空间分布格局研究方法概述[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(2): 17–21.
- [83] 孙艳霞, 杨九艳, 乔宜青, 等. 西鄂尔多斯狭叶锦鸡儿种群分布格局[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(6): 78–85.
- [84] 曾勇, 赵成义, 李传金, 等. 塔里木河沿岸不同生境下胡杨(*Populus euphratica*)群落的空间分布格局及关联性[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3273–3282.
- [85] 陈育, 杨劼, 张璞进, 等. 西鄂尔多斯半日花(*Helianthemum soongoricum*)种群结构和点格局分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 75–82.
- [86] 刘法, 杨海龙, 高甲荣, 等. 毛乌素沙地羊柴种群点格局分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 98–103.
- [87] 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.
- [88] 李海东, 沈渭寿, 方颖, 等. 雅鲁藏布江中游河岸带几种主要沙生植物种群点格局分析[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 834–843.
- [89] 薛斌瑞, 王承勋. 石羊河下游荒漠–绿洲交错带沙拐枣种群数量动态及分布格局[J]. *温带林业研究*, 2018, 1(1): 53–62.
- [90] 石亚飞, 张志山, 黄磊, 等. 古尔班通古特沙漠半固定沙丘植物群落物种组成和种群结构[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1024–1030.
- [91] 闫涵, 孙芳芳, 马松梅, 等. 梭梭和白梭梭的种群结构与空间分布格局[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(8): 1781–1787.
- [92] 张裕年, 张俊年, 许明, 等. 基于民勤荒漠区人工梭梭种群结构与动态特征研究[J]. *林业科技情报*, 2024, 56(1): 19–21.
- [93] 张裕年, 张俊年, 许明, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭种群的数量动态及分布格局研究[J]. *绿色科技*, 2023, 25(22): 7–11.
- [94] 赵文智, 刘鹄. 干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 243–249.
- [95] 张剑挥, 马全林, 李得禄, 等. 乌兰布和沙漠天然梭梭种群动态及空间分布[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(7): 1198–1207.
- [96] 张进虎, 廖空太, 李德禄, 等. 几种不同生境条件下天然沙冬青种群分布格局与特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(11): 151–154.
- [97] 赵新艳. 沙冬青繁殖行为与种群自组织更新[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [98] 刘晓婷, 王铁娟, 苏日古嘎, 等. 东阿拉善不同发育阶段沙冬青种群的空间分布格局[J]. *草地学报*, 2023, 31(10): 3157–3166.
- [99] 申景昕, 原伟杰, 虞毅, 等. 内蒙古西鄂尔多斯沙冬青退化种群的空间格局及其与发育阶段的关联性[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 19–26.
- [100] 王有德, 何全发, 王兴东, 等. 天然沙冬青生长、更新状况调研及利用前景探讨[J]. *宁夏农林科技*, 2004(3): 28–31.
- [101] 侯平, 尹林克, 严成. 沙冬青生物量研究[J]. *干旱区研究*, 1994, 11(2): 16–22.
- [102] 刘虎俊, 尉秋实, 王继和, 等. 甘肃北碚山沙冬青种群的空间分布格局[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(6): 865–871.
- [103] 刘旻霞, 夏素娟, 南笑宁, 等. 基于Ripley's $K(r)$ 函数的荒漠锦鸡儿种群分布格局[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 606–613.
- [104] 杜俊瑞, 王铁娟, 苏日格嘎. 科尔沁沙地白沙蒿种群结构分析[J]. *内蒙古林业科技*, 2016, 42(2): 20–22.
- [105] 贾喆亭, 杨九艳, 孙艳霞, 等. 阿拉善高原珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)种群空间分布格局[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 119–128.
- [106] 刘家琼. 超旱生植物: 珍珠的形态解剖和水分生理特征[J]. *生态学报*, 1983, 3(1): 15–20.
- [107] 贾喆亭. 内蒙古荒漠区珍珠猪毛菜群落多样性及种群空间格局研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [108] 刘俊霞. 乌兰布和沙漠东北边缘花棒种群空间分布格局及群落特征的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [109] 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 等. 民勤绿洲–荒漠过渡带植物物种多样性及其优势种群空间分布格局研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 92–96.
- [110] 姜莹, 刘哲荣, 刘冠志, 等. 内蒙古沙拐枣群落多样性及种群格局研究[J]. *内蒙古林业科技*, 2016, 42(3): 10–15.
- [111] 马瑞, 赵锦梅, 马彦军, 等. 巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆形态特征与空间分布[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 217–221.
- [112] 张进虎, 唐进年, 李得禄, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1141–1149.
- [113] 郭向东, 罗于洋, 王树森, 等. 不同干扰程度对巴音温都尔沙漠球白刺灌丛空间格局影响的研究[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2019, 42(4): 74–78.
- [114] 左雪. 资源植物群落在石漠化防治中的生态与经济效益分析[J]. *林业科技情报*, 2023, 55(3): 55–57.
- [115] 魏峥, 王晓, 宋维峰, 等. 坡位对浑善达克沙地小叶锦鸡儿空间分布影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 102–107.
- [116] 刘铁山, 岳永杰, 李钢铁, 等. 浑善达克沙地丘间低地3种典型群落空间点格局研究[J]. *内蒙古林业科技*, 2019, 45(2): 16–21.
- [117] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of 'fertile islands' in the desert ecosystem[J]. *Journal of arid Environments*, 1989, 16(3): 257–262.
- [118] Crawford C S, Gosz J R. Desert ecosystems: their resources in space and time[J]. *Environmental Conservation*, 1982, 9(3): 181–195.
- [119] 张德魁, 王继和, 马全林, 等. 腾格里沙漠南缘油蒿与沙蒿种群分布格局[J]. *甘肃科技*, 2008(3): 127–130.

- [120] Manly B F. Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology [M]. London, UK: Chapman and Hall/CRC, 2018: 20–26.
- [121] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 油蒿 (*Artemisia ordosica*) 对半干旱区沙地生境的适应及其生态作用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(5): 684–690.
- [122] 杜峰, 梁宗锁, 胡莉娟. 植物竞争研究综述[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 157–163.
- [123] 武志嘉, 刘建康, 余殿, 等. 宁夏荒漠草原不同坡位下油蒿群落多样性及种群点格局分析[J]. 温带林业研究, 2023, 6(3): 20–26.
- [124] 黄富祥, 高琼. 毛乌素沙地不同防风材料降低风速效应的比较[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 27–30.
- [125] 张华, 李锋瑞, 伏乾科, 等. 沙质草地植被防风抗蚀生态效应的野外观测研究[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 119–124.
- [126] Yang H, Lu Q, Wu B, et al. Vegetation diversity and its application in sandy desert revegetation on Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(4): 619–631.
- [127] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 等. 风沙流对植物生长影响的研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 262–267.
- [128] 王继和, 靳虎甲, 马全林, 等. 干旱区油蒿种群结构和分布格局分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 534–538.
- [129] 曹晏宁, 史利莎, 韩烁, 等. 科尔沁沙地植被恢复中差不嘎蒿种群不同龄级个体的点格局分析[J]. 植物学通报, 2008, 25(4): 437–442.
- [130] 杜俊瑞, 苏日格嘎, 王铁娟. 科尔沁沙地三种蒿属固沙植物的种群空间分布格局分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2017, 46(4): 543–547.
- [131] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 563–570.
- [132] 魏巍, 王晓, 张克斌, 等. 毛乌素沙地不同立地条件对油蒿种群存活、开花分布格局的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 104–111.
- [133] 马志波, 肖文发, 黄清麟, 等. 生态学中的点格局研究概况及其在国内的应用[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6624–6632.
- [134] 牛程旭, 张定海, 张志山, 等. 毛乌素沙地盐池地区固定沙丘主要固沙灌木的空间分布格局与空间关联性研究[J]. 生态科学, 2024, 43(1): 1–9.
- [135] 拓锋, 刘贤德, 刘润红, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群空间格局及其关联性[J]. 植物生态学报, 2020, 44(11): 1172–1183.
- [136] 涂洪润, 李娇凤, 刘润红, 等. 桂林岩溶石山榿木种群空间格局及其关联性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2621–2630.
- [137] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35–40.
- [138] 张力, 杨新国, 王磊, 等. 基于点格局的柠条固沙群落物种空间关联分析[J/OL]. 草地学报: 1–12. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250219.0937.002>.
- [139] 屈志强, 张莉, 丁国栋, 等. 不同配置方式沙蒿灌丛对土壤风蚀影响的对比分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 1–4.
- [140] 张萍, 康经理, 袁瑛, 等. 两类植物型沙丘上植物群落的异同及其对沙丘形态的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7920–7927.
- [141] 孙涛, 贾志清, 刘虎俊, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛沙堆点格局特征[J]. 林业科学, 2020, 56(7): 12–21.
- [142] 黄小, 朱江, 姚兰, 等. 水杉原生种群结构及空间分布格局[J]. 生物多样性, 2020, 28(4): 463–473.
- [143] 任毅华, 周尧治, 侯磊, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉种群不同龄级立木的空间分布格局[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5417–5424.
- [144] Callaway R M, Brooker R W, Choler P, et al. Positive interactions among alpine plants increase with stress[J]. Nature, 2002, 417(6891): 844–848.
- [145] Callaway R M, Walker L R. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities[J]. Ecology, 1997, 78(7): 1958–1965.
- [146] 张程, 张明娟, 徐驰, 等. 宁夏沙湖几种主要荒漠植物成丛性分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 32–39.
- [147] Oksanen J. Plant neighbour diversity[J]. Journal of Vegetation Science, 1997, 8(2): 255–258.
- [148] 樊瑞霞, 李学斌, 陈林, 等. 荒漠草原油蒿 (*Artemisia ordosica*) 种群的空间分布格局特征[J]. 北方园艺, 2016(1): 45–50.
- [149] 张莹花, 刘世增, 刘虎俊, 等. 石羊河中游河岸沙蒿种群的空间格局和关联性分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 256–263.
- [150] 梁爽, 许涵, 林家怡, 等. 尖峰岭热带山地雨林优势树种白颜树空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1273–1282.
- [151] 王茹. 内蒙古草原化荒漠地区典型灌木植物空间分布格局研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [152] 彭舜磊, 闫小婷, 齐光, 等. 伏牛山栓皮栎群落优势种群间关联动态分析[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(3): 326–333.
- [153] 李智叁, 李凤日. 乌兰布和沙漠天然白刺种群及主要伴生种群间关联性研究[J]. 植物研究, 2008, 28(1): 98–103.
- [154] 梁继业, 王彦阁, 杨晓晖. 鄂尔多斯高原雾冰藜在沙漠-河岸过渡带白刺沙堆上的空间分布特征[J]. 草业科学, 2008, 25(5): 42–47.
- [155] 王磊, 孙启武, 郝朝运, 等. 皖南山区南方红豆杉种群不同龄级立木的点格局分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 272–278.
- [156] Wright J S. Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of species coexistence[J]. Oecologia, 2002, 130: 1–14.
- [157] 薛文艳, 杨斌, 张文辉, 等. 桥山林区麻栎种群不同发育阶段空间格局及关联性[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3375–3384.

Research progress on spatial point pattern of sand-fixing shrubs in sandy regions of Northern China

Li Jiale^a, Chen Beibei^b, Zhang Dinghai^a

(a.College of Science / b.College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The spatial point pattern of sand-fixing shrubs not only reveals the biological characteristics of species, intraspecific and interspecific relationships, and the influence mechanisms of environmental factors on species distribution, but also predicts population development trends, providing a reference basis for vegetation restoration. Current research on desert ecosystems, particularly regarding the distribution characteristics and patterns of spatial point patterns of sand-fixing shrubs in northern China's sandy regions, lacks systematic analysis and comprehensive summarization, with relatively limited studies available. Focusing on sand-fixing shrubs in northern China's sandy regions, this study provides an overview of their species composition, biological characteristics, and ecological functions. It reviews key concepts in spatial point pattern analysis, including relevant statistical metrics and null models, and elaborates in detail on the distribution characteristics, patterns, spatial associations among shrubs, and influencing factors of different types of sand-fixing shrubs in these regions. By systematically summarizing the spatial point pattern distribution features and relationships of sand-fixing shrubs in northern China's sandy regions, this research contributes to a comprehensive understanding of intraspecific and interspecific relationships across different scales. Furthermore, it holds significant scientific value for proposing effective ecosystem management strategies tailored to the ecological conditions of northern China's sandy regions at the ecosystem level.

Key words: desert ecosystem; sandy regions of northern China; sand-fixing shrubs; spatial point pattern