

腾格里沙漠东缘流动沙地基于幼苗株高生长动态的先鋒物种筛选及群落配置优化

李全弟¹ 韦孟琪² (通讯作者) 李梦茹¹ 徐鹏¹ 徐兵¹

1.宁夏弘地设计院有限公司 宁夏 银川 750000

2.中卫市林业和草原发展服务中心 宁夏 中卫 755000

【摘要】: 腾格里沙漠东缘流动沙地风蚀沙埋剧烈、土壤贫瘠、水分条件恶劣，是区域生态修复的重点与难点区域，筛选适配性强的先鋒物种、构建稳定人工植被群落是实现流动沙地固定与生态恢复的核心路径。幼苗阶段是沙生植物适应逆境环境、完成定居建植的关键时期，株高生长动态可直观反映植物幼苗的逆境适应性、生长活力与生态适配能力。本研究以腾格里沙漠东缘流动沙地为研究区域，以本土沙生植物幼苗为研究对象，通过定点观测试验，系统监测不同物种幼苗株高时序生长特征，量化分析其生长速率、生长稳定性及逆境响应差异，结合沙地立地环境特征完成先鋒物种科学筛选。同时基于优选物种的生长节律与生态位互补特性，优化流动沙地人工植被群落配置模式。

【关键词】: 腾格里沙漠东缘；流动沙地；幼苗株高；生长动态；先鋒物种筛选；群落配置优化

Selection of pioneer species and optimization of community configuration based on seedling height growth dynamics in the shifting sand dunes of the eastern edge of the Tengger Desert

Li Quandi¹ Wei Mengqi² (Corresponding Author) Li Mengru¹ Xu Peng¹ Xu Bing¹

1. Ningxia Hongdi Design Institute Co., Ltd. Yinchuan, Ningxia 750000

2. Zhongwei Forestry and Grassland Development Service Center, Zhongwei, Ningxia, 755000

【Abstract】: The mobile sandy land on the eastern edge of the Tengger Desert is characterized by severe wind erosion and sand burial, barren soil and harsh water conditions, which is a key and difficult area for regional ecological restoration. Screening highly adaptable pioneer species and constructing stable artificial vegetation communities are the core paths to realize the fixation and ecological restoration of mobile sandy land. The seedling stage is a critical period for psammophytes to adapt to adverse environments and complete colonization and establishment. The dynamic growth of plant height can directly reflect the stress adaptability, growth vitality and ecological adaptability of plant seedlings. Taking the mobile sandy land on the eastern edge of the Tengger Desert as the research area and native psammophyte seedlings as the research objects, this study systematically monitored the temporal growth characteristics of seedling plant height of different candidate species through fixed-point observation experiments, quantitatively analyzed the differences in their growth rate, growth stability and stress response, and completed the scientific screening of pioneer species combined with the site environmental characteristics of sandy land. Meanwhile, the artificial vegetation community allocation model of mobile sandy land was optimized based on the growth rhythm and niche complementarity characteristics of selected species.

【Key words】: Eastern edge of Tengger Desert; Mobile sandy land; Seedling plant height; Growth dynamics; Pioneer species screening; Community allocation optimization

西北干旱荒漠生态系统脆弱且稳定性差,腾格里沙漠东缘作为荒漠—绿洲交错带,承担区域生态屏障核心功能。区域大陆性干旱气候特征突出,降水稀缺、蒸发强烈,风沙活动频发;加之沙地土壤有机质匮乏、水土保持性能低下,天然植被发育受限,土地沙化与风蚀退化问题严峻,威胁生态系统稳定与区域可持续发展。在沙地次生演替过程中,先锋植物兼具强耐旱、耐沙埋、耐贫瘠抗性与速生优势,固定流动沙丘、优化表层微生境,驱动植物群落正向演替,是干旱沙地生态修复的关键功能物种^[1]。

现阶段国内外干旱区先锋植物筛选研究已形成一定理论体系研究多依托植物形态结构与生理抗性指标^[2],开展物种抗逆性能的定性甄别,聚焦物种耐旱、抗风蚀、耐沙埋等单一抗性特征。伴随生态修复技术的精细化发展,植物生长发育动态、田间定植能力、种群长期稳定性逐渐成为先锋物种筛选的核心评价维度,幼苗生长性状也被证实是判定沙生植物逆境适应性的核心依据^[3]。现有研究多集中于毛乌素沙地^[4]、库布其沙地^[5]等典型沙区,针对腾格里沙漠东缘流动沙地的先锋物种定量筛选体系尚未完善,且多数研究局限于单一物种静态抗逆性特征分析,缺乏基于幼苗生长动态的系统性物种筛选与生境适配性量化评价。

工程固沙前期幼苗阶段是沙地生态修复成败的关键生育窗口期,幼苗组织结构稚嫩,对于旱胁迫、风蚀沙埋等沙地逆境环境的耐受阈值显著低于成株植株,幼苗生长发育特征直接决定物种种群拓殖效率与人工植被群落的稳定性。株高时序生长动态是植物适配立地环境、响应复合胁迫的综合生物学表征,可精准反映植物不同生育阶段的环境适应能力、资源捕获利用效率与生长发育潜力,是沙生植物逆境适应性评价与先锋物种筛选的核心量化指标。现阶段腾格里沙漠东缘沙地植被修复工作多依托传统经验开展物种选配^[6],普遍存在物种生境适配性不足、人工群落结构单一、存活率低、群落后期衰退等生态问题,亟需构建基于幼苗生长动态特征的定量筛选体系与群落优化配置模式。

沙地人工植被群落配置以生态位互补、抗逆性匹配、群落结构稳定性提升为核心生态学原则,科学的物种组合与栽植模式可有效提升沙地植被覆盖度,增强生态修复系统的长效稳定性。目前西北沙区人工植被营建多采用单物种连片栽植模式,该模式易造成群落结构同质化、物种生态位重叠度过高、生态系统抗干扰能力薄弱等问题,极易引发植被群落衰退、沙丘二次活化等生态退化现象。虽有部分研究开展混播、间作等复合栽植模式探索^[7],但配置方案多基于野外实践经验,未结合物种幼苗生长节律与生境适配特征开展定量优化,适配腾格里沙

漠东缘流动沙地立地条件的专属群落配置技术体系仍处于空白状态。

本研究以腾格里沙漠东缘流动沙地为研究区域,通过监测多物种幼苗株高时序生长动态,构建先锋物种定量筛选体系,优化沙地人工植被群落配置模式,旨在弥补现有研究体系的不足,为区域流动沙地荒漠化治理与植被稳态群落构建提供理论依据与技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区布设在中卫市沙坡头区迎水桥镇金沙岛内。具体地点位于腾格里湖西侧(西北:105.1153E/37.5456N;东北:105.1166E/37.5442N;东南:105.1140E/37.5435N;西南:105.1129E/37.5451N)。试验区基本气候特点是干旱少雨、风大沙多、日照充足、蒸发强烈,气温年、日差较大,无霜期短而多变,干旱、冰雹、沙尘、霜冻等灾害性天气比较频繁,局部地区暴雨也时有出现。年平均气温8.9℃,年均降水量207毫米,年均蒸发量1829.6毫米,蒸发量为降水量的8.4倍。全年无霜期平均167天,全年日照时数2870小时。主要为荒漠草原植被、沙生植被以及盐生植被等。主要植被有乔木:胡杨(*Populus euphratica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等;草本:沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)和蛛丝蓬(*Halogeton arachnoideus*)等。

1.2 试验方法

本研究主要采用野外定点试验法、动态监测法、数据统计分析法、综合评价法与群落优化配置法开展研究。本试验根据实际立地条件和原生植被,选择罗布麻(*Apocynum venetum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条锦鸡儿、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)和沙柳(*Salix cheilophila*)七种造林树种,其造林密度为334株/亩(株行距1m×2m),栽植密度为一穴1株。

在幼苗初期进行生长量统计和环境因子的采集,频率为每两月一次(4月、6月、8月、10月)。并按照不同的生长阶段,分为三个阶段,定植缓苗与春季快速生长阶段(4—6月)、夏季高温干旱胁迫阶段(6—8月)、生长季末秋季生长衰减阶段(8—10月)。通过野外定点布设试验样地,完成七个物种幼苗定植与动态监测;采用多元统计方法分析幼苗株高生长动态差

异；通过构建综合评价模型筛选优质先锋物种；基于生态位互补原则完成群落配置优化。

1.3 试验设计

本试验于研究区流动沙地典型地段布设野外试验样地，采用完全随机试验设计，设置不同物种处理组，统一幼苗定植规格、定植深度、株行距，消除人为操作与环境误差。试验期间不进行人工灌溉、施肥等干预措施，完全依托自然环境生长，模拟自然沙地植被建群过程。

1.4 指标监测方法

幼苗定植成活后，进入常态化动态监测阶段，定期测定各物种幼苗株高，记录不同时间节点幼苗绝对株高、相对生长高度，计算株高绝对生长速率、相对生长速率。同步监测样地土壤含水量、气温、风沙胁迫等环境指标，记录幼苗生长期间的环境动态变化。监测周期覆盖幼苗完整生长季，保证数据时序连续性。

1.4.1 相对增长速率(Relative Growth Rate, RGR)

RGR 反映苗木相对自身初始高度的生长效率，消除了试验材料初始苗高不均带来的基数偏差，能够客观评价不同处理对苗木生长潜能的影响，是衡量植物生长响应环境、养分、胁迫条件的标准化指标。

$$RGR = \frac{\ln H_2 - \ln H_1}{T_2 - T_1}$$

RGR: 苗高相对生长速率，单位 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

H_1 : 第1次测定苗高（初始高度，cm）

H_2 : 第2次测定苗高（末期高度，cm）

T_1 : 第一次测量时间（d，天数）

T_2 : 第二次测量时间（d，天数）

$\ln$: 自然对数（ln，不是 lg 常用对数）

1.4.2 基于季节生态位分化的先锋物种筛选及群落配置优化

荒漠植被恢复依赖先锋物种固沙、改良土壤、维持群落稳定，不同乡土灌木的生长活力、资源利用节律存在显著季节分异，单一物种造林易出现种内竞争剧烈、生态位重叠度高、群落稳定性差等问题。本节以7种典型荒漠乡土先锋灌木（罗布麻、花棒、柠条、沙冬青、白刺、沙棘、沙柳）4—6月、6—8月、8—10月三季生长指标为基础，采用 Levins 生态位宽度、Pianka 生态位重叠度、熵权 - TOPSIS 综合评价模型主流生态学定量方法，量化各物种资源利用能力与季节生态位分化特征，筛选优质先锋物种；并基于生态位互补、低重叠高适配原则构建多物种复合群落配置方案，为干旱区人工固沙植被营建提供理论依据。

2 结果

2.1 不同生长阶段 RGR 的动态变化

2.1.1 定植缓苗与春季快速生长阶段

4月定植后，土壤春季融墒、气温温和、饱和水汽压差小，大气干旱胁迫弱；苗木完成根系定植恢复，快速展叶并建立光合系统，光合产物优先投入株高营养生长，无生殖生长消耗碳分配，因此所有物种相对生长潜力达到全年峰值。

该阶段 RGR 分化极强：花棒（0.3206）、白刺（0.2850）、罗布麻（0.2159）位列前三，属于早春脉冲型先锋灌木；沙柳、柠条、沙冬青春季 RGR 偏低，属于稳生型物种。

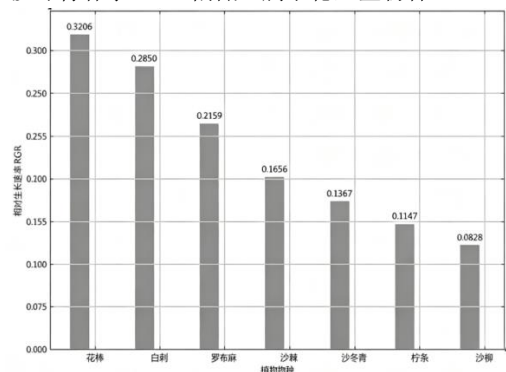


图 2-1: 定植缓苗与春季快速生长阶段 RGR 对比图

2.1.2 夏季高温干旱胁迫阶段

夏季气温攀升、蒸发加剧，土壤表层含水量快速下降，大气饱和水汽压差 (VPD) 升高，气孔关闭抑制光合；同时部分物种进入孕蕾、开花阶段，光合碳向生殖器官分配，株高生长投入减少，全物种 RGR 大幅回落。仅柠条、沙柳维持相对较高 RGR（0.0738、0.0781），其余物种 RGR 降至 0.05 以下，沙冬青仅 0.0118，夏季生长近乎停滞。

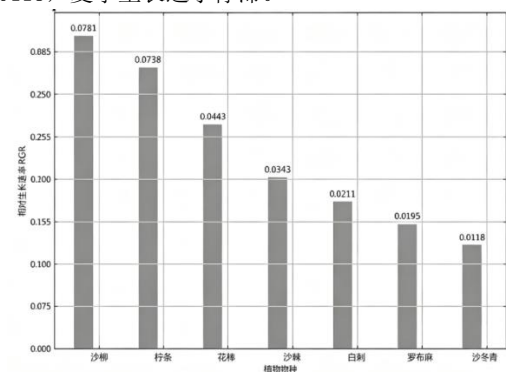


图 2-2: 夏季高温干旱胁迫阶段 RGR 对比图

2.1.3 生长季末秋季生长衰减阶段

气温逐步降低，但土壤深层水分消耗殆尽，光合速率持续下降；苗木开始储存非结构性碳水化合物 (NSC) 向根系转运，为越冬休眠储备养分，株高营养生长基本停止，绝大多数物种

RGR 降至全年最低值。柠条仍保持最高后期 RGR (0.0489)，体现其持续生长的生活史策略。

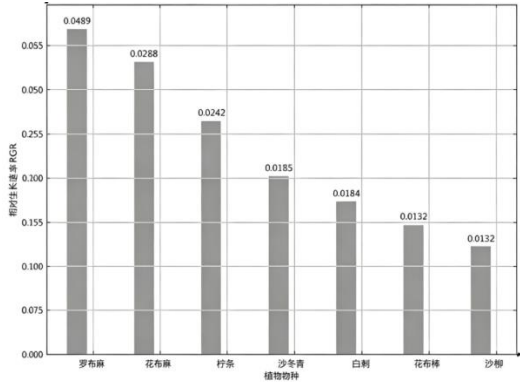


图 2-3：生长季末秋季生长衰减阶段 RGR 对比图

2.2 基于季节生态位分化的先锋物种筛选及群落配置优化

2.2.1 荒漠灌木分季节资源利用

花棒、白刺、罗布麻、沙冬青 4 个物种资源利用峰值高度集中于 4—6 月春末，夏季、秋季生长活性大幅衰减；柠条、沙柳三季资源分配相对均匀，无极端峰值；沙棘介于两类之间，春季占主导，夏秋保持稳定低水平生长。物种季节资源利用差异直接决定生态位宽窄与种间竞争强度。

表 2-1 荒漠灌木分季节资源利用表				
物种名称	4—6 月	6—8 月	8—10 月	合计资源利用总量
罗布麻	0.2159	0.0195	0.0288	0.2642
花棒	0.3206	0.0443	0.0132	0.3781
柠条	0.1147	0.0738	0.0489	0.2374
沙冬青	0.1367	0.0118	0.0132	0.1617
白刺	0.2850	0.0211	0.0185	0.3246
沙棘	0.1656	0.0343	0.0242	0.2241
沙柳	0.0828	0.0781	0.0184	0.1793

2.2.2 Levins 生态位宽度指数

柠条、沙柳生态位宽度显著高于其余物种，属于全年资源均衡利用的广谱适应物种；白刺、花棒、沙冬青、罗布麻生态

位宽度偏低，生长高度依赖春季水热条件，环境抗干扰能力弱，单一种植易出现夏季地表裸露、风蚀加剧问题。生态位宽度排序：柠条>沙柳>沙棘>罗布麻>沙冬青>花棒>白刺。

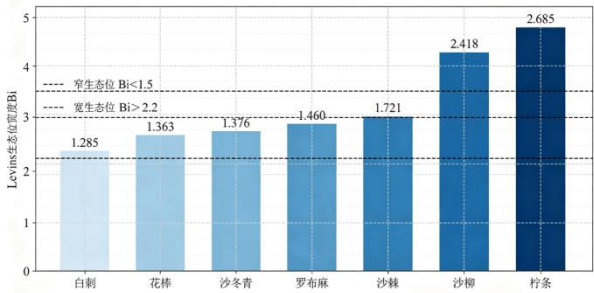


图 2-4 Levins 生态位宽度指数图

2.2.3 Pianka 生态位重叠指数

由下表可知，罗布麻、花棒、白刺、沙冬青相互间重叠系数均大于 0.9，属于高竞争类群，不可高密度混栽；柠条、沙柳与春季特化型灌木重叠值普遍低于 0.5，季节资源利用错位，互补优势突出；柠条与沙柳二者重叠系数 0.874，大面积纯林或二者高密度混植易产生夏秋资源竞争。

2.2.4 熵权 - TOPSIS 综合评价模型（优质先锋物种筛选）

综合得分排序：花棒>白刺>罗布麻>沙棘>柠条>沙柳>沙冬青。可划分为以下几种：

I 级核心先锋：花棒、白刺、罗布麻；4—6 月生长量远高于其他物种，春末固沙拓荒能力极强，是沙地初始植被营建首选先锋；

II 级稳定伴生先锋：沙棘、柠条；三季生长均衡，弥补核心先锋夏秋生长短板，维持群落持续覆盖；

III 级辅助配植种：沙柳、沙冬青；整体生长量偏低，不适合单种造林，仅作为混交调节生态位的辅助物种。

表 2-2 Pianka 生态位重叠指数重叠矩阵							
物种	罗布麻	花棒	柠条	沙冬青	白刺	沙棘	沙柳
罗布麻	—	0.972	0.516	0.981	0.954	0.927	0.493
花棒	0.972	—	0.478	0.965	0.986	0.904	0.451
柠条	0.516	0.478	—	0.492	0.435	0.621	0.874
沙冬青	0.981	0.965	0.492	—	0.947	0.913	0.476
白刺	0.954	0.986	0.435	0.947	—	0.889	0.412
沙棘	0.927	0.904	0.621	0.913	0.889	—	0.585
沙柳	0.493	0.451	0.874	0.476	0.412	0.585	—

表 2-3 Pianka 熵权 - TOPSIS 综合评价模型				
物种	最优距离 D+	最劣距离 D-	贴近度 Ci	先锋等级
花棒	0.0124	0.0967	0.886	I 级优质核心先锋
白刺	0.0186	0.0872	0.824	I 级优质核心先锋
罗布麻	0.0273	0.0715	0.723	I 级优质核心先锋
沙棘	0.0415	0.0528	0.560	II 级稳定伴生种
柠条	0.0462	0.0451	0.494	II 级稳定伴生种
沙柳	0.0537	0.0368	0.407	II 级稳定伴生种
沙冬青	0.0681	0.0214	0.239	III 级辅助点缀种

2.3 基于生态位互补的荒漠群落优化配置方案

结合 TOPSIS 综合得分（先锋潜力）+ 生态位宽度（季节稳定性）+ Pianka 生态位重叠（种间竞争）三重指标，遵循“核心先锋 + 宽生态位稳定种 + 低生态位重叠辅助种”互补配植思路，构建 3 类差异化人工群落，群落配置模式见图 2-5。

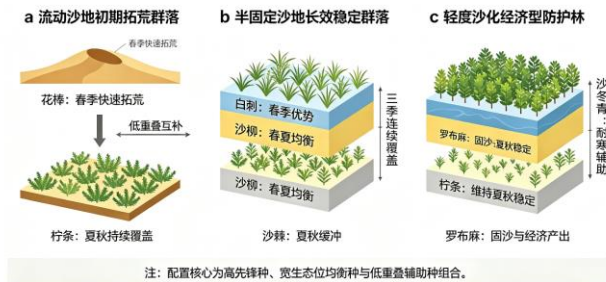


图 2-5 基于生态位互补的荒漠群落优化配置方案

a. 流动沙地初期拓荒群落（高先锋性优先）

物种组合：花棒（核心先锋）+ 柠条（稳定宽生态位）

生态位互补逻辑：花棒生态位窄，仅春季爆发生长，快速固定流沙；柠条生态位最宽，6—10 月持续利用土壤水分，二者季节资源利用节律错位，生态位重叠度仅 0.478，竞争压力小；

群落优势：前期固沙效率高，夏季柠条弥补花棒生长空白，避免地表裸露，降低风蚀。

b. 半固定沙地长效稳定群落（全年覆盖优先）

物种组合：白刺 + 沙柳 + 沙棘

生态位互补逻辑：白刺春季资源利用强度高，沙柳春夏均衡生长，沙棘夏秋平稳过渡；白刺与沙柳重叠值 0.412，两两重叠均处于低水平，4—10 月分阶段捕获光、水资源，无激烈季节种间竞争；

群落优势：三季均有高活性植被覆盖，改良土壤持续性强，适合中度沙化土地长期修复。

c. 轻度沙化复合经济型群落（生态 + 经济兼顾）

物种组合：罗布麻 + 柠条 + 沙冬青

生态位互补逻辑：罗布麻春季快速拓荒且具备经济价值，柠条宽生态位维持夏秋群落稳定，沙冬青耐寒耐旱作为冬季常绿辅助层；罗布麻与柠条重叠 0.516、与沙冬青 0.981，沙冬青仅少量点缀，不形成竞争；三者季节资源峰值完全错开，生态位互补性最优；

群落优势：绿洲边缘、轻度沙化耕地防护林，兼顾固沙与经济产出。

3 讨论与结论

3.1 不同生长阶段 RGR 的动态变化

本研究中 7 种荒漠植物在 4—10 月生长季内的指标动态变化，反映了干旱区植物对季节水热环境变化的生态适应机制。所有物种均表现出一致的季节分异特征，整体表现为定植缓苗与春季快速生长阶段（4—6 月）数值最高，夏季高温干旱胁迫阶段（6—8 月）与秋季生长衰减阶段（8—10 月）显著降低。4—6 月研究区气温回升、土壤融冻释水，水热组合条件最优，为植物定植缓苗、根系恢复与光合物质积累提供了良好环境，是荒漠植物年度生长的关键窗口期，植物在此阶段快速进行营养生长与植株构型构建，以充分利用生长季初期有限的适宜生境条件^[8]。

物种间对比结果表明，花棒、白刺、罗布麻在 4—6 月生长优势显著，指标值分别达 0.3206、0.2850、0.2159，体现出典型的机会型资源利用策略。该类物种根系扩展与光合响应能力较强，可快速利用春季浅层土壤水分与光照资源完成生物量积累。进入 6—8 月夏季高温干旱胁迫阶段，研究区高温、强蒸发导致浅层土壤水分耗竭，胁迫环境加剧，所有植物指标均显著下降。该变化为荒漠植物重要的逆境适应策略，植株通过降低光合速率、抑制营养生长、减少水分消耗，维持机体水分平衡与核心器官存活，从而适配夏季极端干旱环境^[9]。

柠条与沙柳在夏季胁迫阶段仍保持相对较高的指标水平，分别为 0.0738 与 0.0781，高温干旱适应性显著优于其他物种。该特性主要源于其根系结构与生理调控优势，二者深根系可有效获取深层土壤水分，规避表层土壤干旱的限制，同时具备较强的叶片保水与气孔调节能力，可在高温胁迫下维持稳定的光合与代谢过程，生长季适应范围更广，是干旱区稳定性较高的灌木物种^[10]。沙冬青各季节指标均维持较低水平且季节波动微弱，反映出其慢生长、强抗逆的常绿物种适应特征，通过低代谢的稳定生理状态弱化季节环境扰动，以较低的生长速率换取较强的环境存续能力^[11]。

在 8—10 月秋季生长衰减阶段，各物种指标整体维持低位小幅波动。该阶段气温逐渐回落，但土壤水分与养分经春夏季持续消耗后处于匮乏状态，植物生长受到显著限制，植株代谢由营养生长转向养分积累与休眠预备，为越冬及翌年萌发储备物质与能量。总体而言，7 种荒漠植物在春季快速生长、夏季胁迫抑制、秋季生长衰退 3 个阶段的功能差异，体现了物种间资源分配与胁迫适应策略的功能分化。机会型物种依托春季适宜环境快速积累生物量，耐逆型物种可耐受夏季极端环境、维持持续生长，常绿保守型物种保持稳定低代谢状态以适应长期干旱。该种间功能分化提高了荒漠植物群落的资源利用效率与

抗干扰能力,对维持干旱区植被群落结构稳定与生态修复具有重要意义。

3.2 群落配置优化模式的生态优势与应用价值

当前干旱区固沙物种筛选相关研究多采用单一时段生长指标开展静态评价,难以表征灌木周年资源利用节律差异;人工植被群落配置多依托野外实践经验定性组合,缺乏量化手段预判种间资源竞争强度。本研究以西北荒漠区7种典型乡土固沙灌木为研究对象,选取4—6月、6—8月、8—10月三个关键生长时段构建季节资源梯度,耦合 Levins 生态位宽度、Pianka 生态位重叠指数与熵权 TOPSIS 多目标综合评价模型^[12],从资源利用幅度、种间季节竞争、先锋适配综合潜力三个维度开展定量解析,建立一套覆盖物种分级、群落优化的完整量化分析体系。

传统单一指标评价仅能反映物种特定时期生长优势,无法区分短期拓荒效能与长期群落维持潜力。本研究引入时序生态位分析框架,依据季节资源分配特征将参试灌木划分为宽、中、窄三类生态位功能类群,厘清春季特化型、周年均衡型物种的生态功能分异特征,弥补静态评价忽视季节动态分异的缺陷,完善干旱区乡土灌木适配性评价的时间维度。

传统混交造林模式未通过定量指标区分种间竞争风险,易

出现同期高耗水物种混植引发幼苗存活率下降的问题。本研究以生态位重叠系数作为种间竞争分级阈值,结合物种综合先锋贴近度、生态位宽度双重约束条件筛选适配物种组合,基于生态位互补原理针对流动沙地、半固定沙地、轻度沙化土地三类立地类型构建差异化复层群落营建模式;通过季节资源利用节律错位降低种间水分竞争压力,维持生长季连续地表植被覆盖,提升人工群落抵御极端干旱、风蚀扰动的长期稳定性。研究结果表明,针对不同类型择优选择下面三种搭配方案:

1. 流动沙地初期拓荒群落(高先锋性优先)

物种组合:花棒(核心先锋)+柠条(稳定宽生态位)

2. 半固定沙地长效稳定群落(全年覆盖优先)

物种组合:白刺+沙柳+沙棘

3. 轻度沙化复合经济型群落(生态+经济兼顾)

物种组合:罗布麻+柠条+沙冬青

由不同生态位类型灌木错峰组配形成的复合群落,可实现生长周期内光照、土壤水分、养分资源的分阶段高效利用,持续发挥固沙保土、土壤改良等生态功能。本研究构建的时序生态位测算—多目标综合评价—低竞争群落组配技术路径,可为宁夏及西北同类干旱沙区人工固沙植被的物种筛选、复层混交植被营建提供量化理论支撑与实操依据。

参考文献:

- [1] 徐彩琳,李自珍.干旱荒漠区人工植物群落演替模式及其生态学机制研究[J].应用生态学报,2003,(9):1451-1456.
- [2] 生秀,赵鹏.流动沙丘先锋植物沙米对风沙流和干旱胁迫的光合生理响应[J].西北植物学报,2022,42(11):1910-1918.
- [3] 赵聪聪,胡远东.多尺度下吉林省城市自生植物多样性格局与尺度适配性应用策略[J].风景园林,2026,33(3):62-72.
- [4] 石文杰,李小伟,任振强,等.毛乌素沙地不同年限柠条固沙林林下草本土壤种子库特征研究[J/OL].草业学报,1-13.
- [5] 安达,王海兵,白云菲,等.库布齐沙漠柠条林空间分布格局与景观特征研究[J].林草资源研究,2024,(2):43-50.
- [6] 高苗苗,蒙仲举,高永,等.腾格里沙漠东北缘飞播造林对植被多样性的影响[J].农业与技术,2022,42(19):69-73.
- [7] 马占忠.试论腾格里沙漠固沙造林相关技术组合应用[J].农业科技与信息,2009,(16):22-23.
- [8] 王斌,华晓琴,马鸿文,等.武威北部荒漠区不同治沙模式下土壤水分及植被多样性[J].林业科技通讯,2025,(11):79-81.
- [9] 许双堆,杨广,何新林,等.干旱区荒漠植被生理生化指标和光合特性[J].人民黄河,2015,37(6):71-74.
- [10] 白思璐,周明涛,刘志敏,等.干旱胁迫对护坡植物柠条生理特性的影响[J].生态学报,2026,46(9):4922-4934.
- [11] 邓煜,马正政,王先英,等.干旱胁迫对蒙古沙冬青种子萌发及幼苗生长的影响[J].西北林学院学报,2026,41(3):38-46.
- [12] 冯湘,刘宝军,刘建康,等.半干旱区人工封育草地植被动态研究——以宁夏盐池县为例[J].生态环境学报,2020,29(10):1961-1970.

作者简介:李全弟(1994—),男,汉族,甘肃天水,研究生,宁夏弘地设计院有限公司,林业中级,研究方向为沙化土地综合治理。