

李仓拴, 张琼文, 王菲, 刘晖. 草本植物群落的抗入侵性: 影响机制与设计策略[J]. 风景园林, 2024, 31 (11): 79-85.

草本植物群落的抗入侵性: 影响机制与设计策略

李仓拴 张琼文 王菲 刘晖*

摘要: 【目的】除草一直是园林草本植物群落管理的棘手问题, 而提高群落的抗入侵性是降低除草成本的关键途径。群落抗入侵机制作为入侵生态学研究的核心内容, 旨在揭示生态因子对群落抗入侵性的影响规律。受制于研究范式的差异, 这些规律须经过设计应用转换, 才能真正实现理论指导实践。【方法】通过文献分析, 梳理群落抗入侵性影响机制, 并从风景园林的视角提出群落抗入侵性提升策略。【结果】草本植物群落抗入侵性受生境、群落结构、群落组成和干扰等因素的综合影响, 其中群落组成是主要影响要素; 群落的抗入侵机制可通过生态学变量和设计变量的关联, 转化为具体的生境营造、群落设计、建植途径和管理维护等提升抗入侵性的设计策略。【结论】生态学基础理论可以被转换为对设计具有指导意义的操作方法, 关键在于找到生态变量与设计变量的关联, 这也是实现生态学与风景园林交叉的“桥梁”之一。
关键词: 风景园林; 植物群落设计; 抗入侵性; 入侵生态学; 杂草; 生态设计
基金项目: 国家自然科学基金青年项目“园林草本植物群落 CSR 功能群构成与稳定关系研究”(编号 32401654); 陕西省自然科学基金青年项目“基于生物多样性的关中城市缀花草坪植物群落设计模式研究”(编号 2021JQ-176)

中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2024)11-0079-07

DOI: 10.3724/j.fjyl.202309150424

收稿日期: 2023-12-31

修回日期: 2024-07-03

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



群落抗入侵性 (invasion resistance) 又称抵抗力稳定性, 常用杂草生物量来评估, 用于表征群落抵抗外界干扰并使自身的结构和功能保持原状的能力^[1]。长期以来, 由于城市园林绿地建设缺乏对于植物景观抗入侵性的深入认识与实践, 园林草本植物群落的抗入侵功能严重不足, 致使杂草大量入侵并挤占栽培植物生存空间与资源, 导致生物多样性下降和景观价值丧失^[2]。因此, 大量城市绿地实践中必须依赖高强度的除草工作才能维持植物群落生长平衡, 致使城市绿地养护成本费用逐年上涨, 如北京在 2022 年将特级绿地的年养护费上调至 25 元/m², 较 2008 年的 15 元/m² 上涨 67%^[3]。目前, 中国已将提升植物群落抗入侵性纳入城市绿地的建设工作, 特别是在 2021 年 6 月发布的《关于科学绿化的指导意见》中, 明确提出将“着力提高生态系统自我修复能力和稳定性”作为城乡绿化的总原则之一, 同时要求城市绿地的建设要“统筹考虑生态合理性和经济可行性”^[4]。随着中国城市绿地规模的持续扩大, 如何提升城市植物群落的抗入侵性以降低管理维护成本, 将是未来研究的重要方向。

事实上, 在实践和研究领域对于提升园林草本植物群落抗入侵性的探究从未停止。早在 19 世纪, Chatto 等^[5]就提出通过砾石覆盖来抑制杂草; 到了 21 世纪, 城市绿地规模的增加使得除草支出大幅上涨, 过度使用除草剂的负面作用也开始显现, 迫使设计研究领域通过实验的方式寻求解决途径, 如添加覆盖物^[6]、增加种植密度或盖度^[7]、增加群落层数^[8]、增加较早萌发的物种^[9]。上述策略一方面是通过控制外因达到限制群落中可利用资源的目的, 另一方面是改变单一因子以提高群落本身的抗入侵性, 然而由于缺少对于复杂性和系统性群落抗入侵机制的认知, 以及贯穿于设计、实施和管理维护全过程的操作方法^[10], 这些方式在实践中仍然缺乏系统性和可持续性, 无法从根本上解决实践中群落抗入侵性不足的难题。

草本植物群落的抗入侵机制一直是入侵生态学研究的核心与热点问题, 旨在研究生态因子对群落抗入侵性的影响, 近年来已有相关研究揭示了诸多的规律^[11], 其研究成果对于提高园林草本植物群落的抗入侵性具有重要的启示意义。然而, 由于研究范式的差异,

生态学规律与设计实践方法之间存在巨大的鸿沟^[12]; 若要运用生态学规律以指导设计, 一方面须系统梳理草本植物群落抗入侵性的影响机制, 另一方面须以实践为导向, 将上述规律转化为能够直接指导群落营建的可操作方法。鉴于此, 本研究将梳理影响群落抗入侵性的要素及其与群落抗入侵性的关系规律, 并将这些规律转化为指导群落抗入侵性提升的设计策略, 以期为群落设计实践提供理论依据和方法指导。

1 草本植物群落抗入侵性影响机制

1.1 场地生境与群落抗入侵性

1.1.1 光照

光照是场地生境中异质性程度最高的生境条件之一, 而入侵植物通常具有较高的光合利用效能, 以此占据竞争优势^[13]。光照与养分同时增加更能加剧外来入侵植物对本地植物的竞争排斥^[13]。已有实验研究表明, 同种群落在不同光照条件下表现出不同的抗入侵性, 这说明光照条件是影响群落抗入侵性的重要因素, 其中阴生生境群落的抗入侵性最强, 半阳生生境次之, 阳生生境最差^[14]。

1.1.2 水分

水分作为限制性资源,其供给直接影响植物对水资源的竞争强度,从而导致增强或削弱群落的种间竞争^[15]。例如在降雨相对丰富的地区和年份更易发生入侵,其原因是土壤表层水分含量越高,越有利于促进土壤种子库萌发^[16-18]。值得注意的是,干旱时期极低的土壤水分含量会导致植物死亡并打断群落种间原有的紧密联系,干旱时期结束后群落的抗入侵性仍可能持续降低^[15]。

1.1.3 土壤

营养作为限制性资源,土壤营养水平对群落抗入侵性起着重要的调控作用。如 Davis 等^[15]发现入侵更容易发生在碳、氮和磷含量相对较高的肥沃土壤中。对于这一现象的形成机制,一种观点认为外来入侵植物对可利用资源的响应比本地种更为强烈,如 Wedin 等^[19]证实土壤中的可利用性氮促进了外来入侵物种的快速生长和繁殖;但也有少数研究持有相反的观点,如 Renne 等^[20]发现本地种随着氮素的输入而生长加快,对入侵者的抵抗力会因养分含量的提升而增强。

1.2 群落结构与群落抗入侵性

1.2.1 垂直结构

人工群落中禾草层植物在抵抗杂草入侵方面发挥着重要的作用。目前,多数研究证实设计增加群落的层数有助于增强抗入侵性,如 Hitchmough 等^[21]发现两层结构的群落抗入侵效果优于单层结构;West^[22]在实践中发现增加群落下层植物的种植密度能够有效减少杂草。

1.2.2 水平结构

群落水平结构是由物种生态学特性、种间相互关系以及环境条件综合决定的,它在构成群落的形态、功能和动态变化中都有重要的作用。多样性阻抗假说认为结构单一的群落更容易被入侵^[23],尤其是在水平结构上,群落抗入侵性呈现出显著的边缘效应,如笔者^[14]在实验中发现,入侵植物更多地出现在群落的周围,而中心部位入侵植物分布较少。理论上,群落边缘抗干扰能力差,界面易发生变异,即群落边缘抗入侵性更差^[24]。同时,盖度是比高度和多度更为重要的影响因素,

如笔者^[14]发现,当物种组成相同时,群落的抗入侵性差异主要源于相对盖度。

1.2.3 生态位

生态位作为群落结构的一种呈现方式,被认为是影响群落抗入侵性的重要因素。达尔文提出的移入假说(Hypothesis Transfer)指出,当入侵地具有与外来种生态位重叠的本地种时,外来种将很难入侵^[25];之后 Elton 进一步提出了空余生态位假说(Empty Niche Hypothesis),即群落易遭受入侵是因为本地种数量的相对贫乏^[26]。随后,更多的研究聚焦于本土植物与入侵植物之间的竞争关系上,如 Fargione 等^[27]在实验中证明,当本地物种与外来物种的功能特点一致时,外来物种的丰富度显著降低。笔者^[14]研究发现,杂草更容易出现在两个冠幅较大植株之间的空白区域。

1.3 群落组成与群落抗入侵性

1.3.1 物种组成

群落的抗入侵性同样受制于其组成物种,笔者发现在相同的物种丰富度条件下,不同物种组成的群落抗入侵性差异明显^[14]。同时,多项研究表明群落中部分特殊物种可以增强群落抗入侵性:一是萌发速度较快的物种,如 Gioria 等^[9]通过实验发现快速萌发的物种能够提前建立竞争优势,从而提高群落的抗入侵性;二是禾草类植物,如 Rainer 等^[28]在实践中发现在群落下层种植禾草类植物作为地被层,可以有效地抑制杂草;三是本地物种,岛屿生物学理论认为岛屿群落和其他一些群落易遭受入侵是因为本地物种数量的相对贫乏^[13]。另外,有部分研究发现群落中本地物种多样性与抗入侵性正相关,如 Li 等^[29]发现丰富的本地物种多样性能够有效地抵御外来物种入侵。

1.3.2 物种丰富度

物种丰富度概念是 Elton 在 1958 年提出的,一度被认为是影响群落抗入侵性的核心因素^[26],在此基础上,生态学界提出了物种丰富度假说(Species Richness Hypothesis),即群落抗入侵性与群落中物种数量正相关^[30],如 Kennedy 等^[31]发现物种丰富度对于外来种定殖的影响显著。但在随后的研究中,大量

的实验结果显示群落物种丰富度和抗入侵性负相关^[32]或者无关^[33]。另有对比实验显示,群落的抗入侵性随功能群数量而变化,不受物种丰富度的影响^[5,29]。对此,多数学者认为群落抗入侵性本质上是由植物功能群多样性主导,如 Li 等^[29]发现高物种丰富度群落主要通过本地物种功能多样性等来抑制入侵种的生长表现;Wang 等^[34]发现群落抗入侵性取决于植物的种类多样性、相对多度和生长表现。在自然界,群落物种丰富度呈现出显著的规律,如马文红等^[35]研究表明多数草地群落的物种丰富度为 4~35。

1.3.3 功能群多样性

保险假说(Insurance Hypothesis)的提出是对物种丰富度假说的修正,其理论核心为群落的功能群多样性越高,群落的抗入侵性越强^[36]。当前,对于植物功能群存在多种分类方法,在功能群构成(数量与组合)对群落抗入侵性影响的相关研究中,主要选用以下分类:1)一二年生植物或多年生植物^[37-38];2)禾草类、非禾本科植物和豆科植物^[39];3)C3(碳三)、C4(碳四)植物^[40];4)植物 CSR 策略分类模型^[41]。以上 4 种功能群类型均在不同程度上表明了功能群多样性与抗入侵性的关系,证实了功能群数量与功能群组合对群落抗入侵性具有显著的调节作用。

1.4 干扰与群落抗入侵性

1.4.1 刈割

刈割常被用于抑制草地群落中杂草生长^[41],原因在于刈割能够降低不耐刈割杂草植物的生长势^[42],为弱竞争者提供生长机会,从而显著削弱群落的种间竞争,提高群落抗入侵性。也有研究表明,刈割通过移除高大植物的上部,增加透光性,促进中下层植物的生长,同时降低凋落物累积量,促进杂草种子萌发^[43]。

1.4.2 火烧

通过火烧减少杂草植物的种子和繁殖体,可提高群落抗入侵性。已有研究表明,多年生植物在已经生长并且储备物已经从储藏器官移位后,对火烧特别敏感^[44]。此外,烧过的地方由于土壤温度升高,植被会提前开花和结果,这种早熟的现象会持续到下一个

季节^[43]。

1.4.3 地面覆盖

通过覆盖物抑制杂草生长是目前设计实践中较为推崇的方法。近年来，已有研究不断聚焦于覆盖物的类型、规格及覆盖时间，如 Schmithals 等^[4]通过实验证实沙砾石覆盖能在第一个生长季减少杂草的萌发，有效提高群落建立第一年的抗入侵性，其原因是砾石覆盖可以有效抑制土壤中光依赖性杂草种子的发芽。笔者研究发现，各类覆盖物对群落抗入侵性的作用强度排序依次为砾石覆盖 > 无覆盖 > 松鳞覆盖^[14]。

1.4.4 种子库

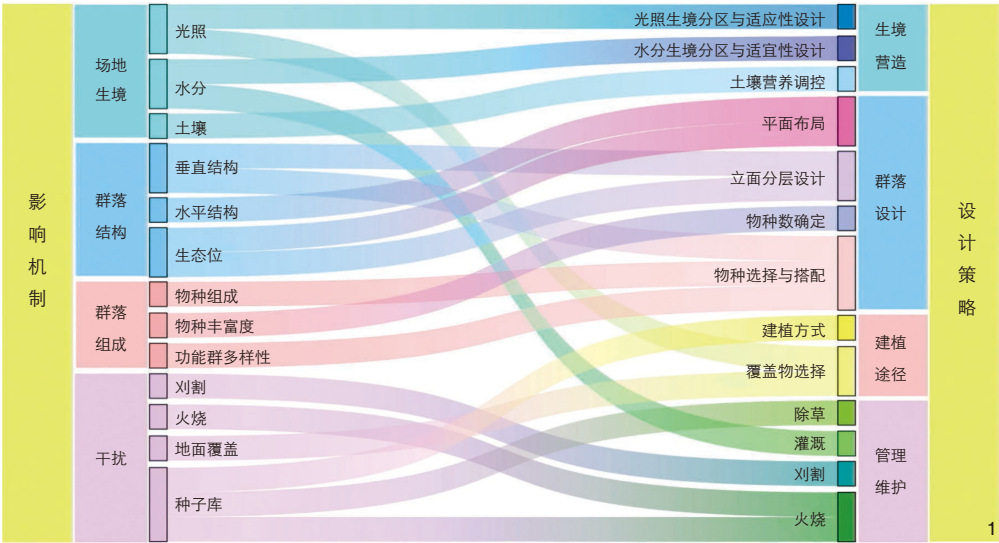
土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活的种子总和。干扰能降低土壤种子库的密度，并且能改变土壤种子库的物种组成^[45]。土壤种子库与地上植被具有密切的相似性，如淡水潮汐沼泽群落、一年生牧场群落、沙漠矮草群落和地中海沿岸沙丘群落。理论上，种子库和种子雨中的物种数量越多，群落被入侵的概率越大^[46]。

2 草本植物群落的抗入侵性提升设计策略

总体而言，群落的抗入侵性受场地生境、群落结构、群落组成和干扰的影响，这些因子共同组成了影响抗入侵性的生态变量。从设计学的角度而言，一个完整的草本植物群落设计营造包括生境营造、群落设计、建植途径和管理维护，这些设计营建要素共同构成了影响抗入侵性的设计变量。在此基础上，本研究系统建立了影响抗入侵性的生态变量和设计变量之间的关联（图 1），通过生态变量与抗入侵性的关系反推群落在何种条件下能具有较高的抗入侵性，实现从影响机制到设计策略的转换。

2.1 生境营造

生境包括植物生长必需的生存条件（光照、水分、土壤等）和其他生态因素（踩踏、地面覆盖等）。而生境对于群落抗入侵性的影响主要是通过环境资源而实现的^[2]，因此在草本植物群落设计营造过程中，通过调控光照、水分、土壤等生境因子来影响群落，以



1 群落抗入侵性机制与设计策略关系
The relationship between mechanisms of community invasion resistance and design strategies

此提高植物群落抗入侵性。

2.1.1 光照生境分区与适应性设计

光照作为城市环境中异质性最强、对植物群落影响最大的生境因子，可划分为阳生（6 小时及以上）、半阳生（4~6 小时）、阴生（0~4 小时）生境^[47]。群落中营养物质和光照强度同步增加，更利于入侵种生长^[14]。因此在设计层面应合理控制资源，对光照时间越长的生境分区，群落中越宜增加喜光植物的比例（尤其是上层植物）；在光照时间越短的分區，越应该注重群落物种对光照资源竞争的差异与平衡。

2.1.2 水分生境分区与适宜性设计

过高和过低的土壤水分均会降低群落的抗入侵性，应通过人工调控，使土壤含水量保持在适度的区间。对于湿区，可通过添加沙砾等措施，提高土壤的孔隙度和下渗能力；对于干区，可通过人工补水或在土壤表层添加如松鳞、砾石和细沙等覆盖物的方式提高土壤的保水能力^[48]。

2.1.3 土壤营养调控

将土壤养分控制在合理范围利于提升群落抗入侵性。由于城市多选址于适耕区，加上长期施肥等人为因素，导致城市中多数土壤营养普遍过剩^[49]。降低土壤肥力有助于将群落维持在草本演替阶段，而过低的肥力又会

抑制植物开花，尽可能将肥力保持在这个临界点。为提高城市绿地的群落抗入侵性，有必要进行土壤贫瘠化处理^[49]，而最为经济的方式是将深度 30 cm 的表土和 60 cm 的下层土进行置换^[21]。必要的情况下，在植物生长发育阶段及时施入适量氮肥，减少可利用的光照强度和水分，以抑制杂草植物种子的萌发和生长^[20]。

2.2 群落设计

2.2.1 平面布局

在群落设计中应顺应每个种群特定的自然分布格局，包括密度、株距和分布方式等。需考虑种植密度在经济成本和抗入侵性之间的平衡，因为密度太低则会产生过多的空白生态位，导致群落抗入侵性较差；高密度意味着更高的成本，以及群落自疏效应导致的群落物种死亡。填补空白生态位，能够有效压缩潜在杂草植物的生长空间。此外，设计时应选用冠幅较大的植物或将高度不同的植物交叉种植，尽可能地增加群落的总盖度。

2.2.2 立面分层设计

立面设计对于提高群落的抗入侵性具有至关重要的作用，应尽可能增加群落层数，同时模拟自然群落的分层结构^[50]，如 West 等^[22]所提出的“结构层+季节主题层+地被层”的设计模式，结构层作为群落的骨架，季节

植物构型	示例一	示例二	示例三
全株衔接	木贼	落新妇	美国薄荷
下部衔接	毛蕊花	绵毛水苏	毛地黄
上部衔接	小兔子狼尾草	蜈蚣草	木槿苏

2 植物构型及典型植物
Plant architecture and typical plants

主题层用于创造色彩变换的季相景观，地被层用于填充地表空间。其中，地被层对于群落的抗入侵性具有重要作用，一般由低矮的丘状植物^[2]组成，能够利用群落的下层空间，如藎草属、麦冬属植物。

2.2.3 物种数确定

草本植物群落设计中，物种数量的确定需要在群落生态功能与美学价值之间取得最佳平衡^[21]。基于此，以自然群落物种数为依据，笔者提出草本植物群落物种数的选择范围：优先考虑美学特征，则建议群落物种数为3~5种；优先考虑生态功能，则群落物种数可以为11~35种；兼具美学特征与生态功能，则建议群落物种数为6~10种。

2.2.4 物种选择与搭配

生态位互补的植物搭配有助于提高群落抗入侵性^[51]。植物对于生态位的利用方式可以通过植物构型间接反映，植物构型可划分为全株衔接、上部衔接和下部衔接3种类型，不同构型的植物占据的生态位各不相同，混合搭配可使群落内植物对生态位的利用形成互补（图2）。此外，群落设计中宜选择与杂草具有相似生态位的植物，可增加禾草类植物、乡土植物以及萌发早、生长速率快的植物。

相比植物多样性，功能群构成是群落抗入侵性的决定性因素^[50]，提高群落功能群多样性对于增强群落抗入侵性更具针对性。因此，在群落设计时，应尽可能搭配更多样的功能

群类型：一是将一二年生植物和多年生植物进行搭配；二是将禾草类、非禾本科植物和豆科植物进行搭配；三是将C3植物和C4植物进行搭配；四是选用CSR策略分类模型中的不同生存策略的植物进行搭配。

2.3 建植途径

2.3.1 建植方式

种苗种植和种子混播是最为常见的两种草本植物群落建植方式。种苗建植的优势在于植物生长起点较高，一般在建植2~3个月后群落冠层将会闭合，初步具备抗入侵性；混播则需要1~3年的群落发育时间，这一阶段须不断除草直至群落抗入侵功能形成。

2.3.2 覆盖物选择

覆盖物分为无机覆盖物和有机覆盖物，如果以抗杂草入侵为目的，无机覆盖物是比有机覆盖物更好的选择。覆盖物的厚度与群落的抗入侵性息息相关，当砾石层厚度为4 cm时，第二年春季有大量杂草植物萌发，而8 cm厚的砾石覆盖能够在2年内达到抑制杂草的效果^[14]。若对群落抗入侵能力要求越高，则应选择粒径越小的覆盖物。

2.4 管理维护

2.4.1 除草

除草管理策略应随群落建植的不同阶段而改变。在第一阶段（一般是建植后的1~3年），群落空白生态位较多、植物竞争力弱，需将土壤种子库遏制在萌芽期，在杂草植物幼苗越小时清除效果越好。经过第一阶段，随着群落冠层开始闭合，群落物种组成将趋向稳定^[52]，这一阶段应及时发现并清除多年生杂草和木本植物幼苗。除草的重点时期是每年杂草种子萌发的高峰期（4—10月）。

2.4.2 灌溉

过多的水分会导致嗜水植物种群数量激增并加剧群落竞争，因此管理阶段应严格控制灌溉量。一般而言，草本群落所需的年降水量宜<400 mm，在降水量400 mm左右的区域，除特别干旱外，其余时间均无需浇水；在降水量>400 mm的区域，草本群落易向木本群落演替，须人工调控来降低土壤的含水量，一个可行的方式是在土壤中添加细沙，以降低土壤的保水性。

2.4.3 刈割

当种间竞争失衡时，可通过刈割进行调节。每年刈割2~3次是合适的频率，关键在于时机的选择^[21]，以关中地区为例，每年5—6月是群落迅速生长的季节，7—8月雨量充沛，易导致植物出现倒伏，因此在这两个时段割草，生物量和竞争相互作用会降低群落的抗入侵性^[44]。

2.4.4 火烧

火烧是一种常用的管理手段，不仅可以杀死植物种子，同时可以保持群落稳定性。利用火烧可以催化群落内植物的生长，促进群落物种快速占据生态位，从而提高群落抗入侵性。计划火烧作为一种工具，可以达成控制木本植物和有害杂草、刺激草本植物生长与繁殖、维持生态多样性的目标^[44]。一般在每年冬季结种后对群落进行火烧处理，但操作时应注意消防安全。

3 结语

本研究探究了生态变量与设计变量关系，将群落抗入侵性影响机制转换为设计策略，实现了从基础研究向应用研究的范式转换。利用该框架，可通过追踪群落抗入侵性研究进展与前沿，对群落抗入侵设计策略进行更新和补充，从而为系统提升园林草本植物群落的抗入侵性奠定理论基础。本研究表明，生态学基础理论可以被转换为对设计实践具有指导意义的操作方法，其关键在于找到生态变量与设计变量的关联，这也是实现生态学与风景园林交叉的“桥梁”之一。

在城市绿地规模急速增加和倡导节约型园林的今天，应当加快草本植物群落生态功能尤其是抗入侵性的研究，以使得城市绿地的管理更加“省时、省力、省钱”。以往的研究和实践往往注重消除“结果”而忽略了作为前因的“设计”，往往注重改变外因而忽视了内因，往往注重单一因子的影响而忽视多因子复合作用，致使现有的方法虽能够在短时间内起作用但缺乏可持续性。因此，针对群落除草与抗入侵性的研究应由被动“防御”转变为主动“提升”，在实践中应注重多要素设计和实施的全流程，聚焦于物种搭

配来提高群落的抗入侵性将是未来研究的重要方向。目前,功能群构成多被认为是影响群落抗入侵性的主导因素,因此探寻最优的功能群数量与组合搭配很可能是破解园林草本群落杂草入侵难题的最佳突破口。

注释 (Notes):

① CSR 策略由生态学家 Grime 在 1974 年提出,是通过解释各种功能性状协同变异的主导维度来反映植物的生态对策。CSR 理论所建立的植物对策类型谱包括 3 种基本对策和 16 种次级对策,3 种基本生境类型对应竞争型植物 C (competitor)、耐胁迫型植物 S (stress-tolerator) 和杂草型植物 R (ruderal) 这 3 种基本对策型植物,占据三角模型 (triangular model) 的 3 个角位置,是植物对极端环境的适应性特化,而适应于不同水平的胁迫和干扰之间的特定平衡,植物进化出多种次级对策占据三角形的中间区域。详见参考文献 [41]。

② 丘状植物是指那些形态上呈现丘状或垫丘状的植物,通常具有短而直立的茎、密集的叶子和无梗的小花。

参考文献 (References):

[1] 郑景明, 马克平. 植物群落多样性与可入侵性关系研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17 (7): 1338-1343.

ZHENG J M, MA K P. Research Advances in the Relationships Between Biodiversity and Invasiveness Within Plant Communities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (7): 1338-1343.

[2] 万方浩, 侯有明, 蒋明星. 入侵生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

WAN F H, HOU Y M, JIANG M X. Invasion Biology[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[3] 黄建华, 周晓然. 《北京市城镇绿地养护管理投资标准的意见》实施北京城镇绿地养护费提高[J]. 绿化与生活, 2022 (3): 28-29.

HUANG J H, ZHOU X R. Implementation of the *Opinions on Investment Standards for Urban Green Space Maintenance and Management in Beijing* Has Led to an Increase in Maintenance Fees for Urban Green Spaces in Beijing[J]. Greening and Life, 2022 (3): 28-29.

[4] 国务院办公厅印发《关于科学绿化的指导意见》[J]. 新疆林业, 2021 (6): 14-17.

Guidance on the Greening of Science Issued by China Academic Journal Electronic Publishing House[J]. Xinjiang Forestry, 2021(6): 14-17.

[5] CHATTO B, STEVEN W. Beth Chatto's Gravel Garden[M]. Suffolk: Antique Collectors Club Ltd, 2000.

[6] SCHMITHALS A, KÜHN N. To Mulch or not to Mulch? Effects of Gravel Mulch Toppings on Plant Establishment and Development in Ornamental Prairie Plantings[J]. PloS One, 2017, 12 (2): 35-67.

[7] BARR S, JONAS J L, PASCHKE M W. Optimizing Seed Mixture Diversity and Seeding Rates for Grassland Restoration[J]. Restoration Ecology, 2017, 25 (3): 396-404.

[8] JASINSKAITE S, PILIPAVICIUS V, LAZAUSKAS P. Perennial Weed Control by Two Layer Ploughing[J]. Agronomy Research, 2009 (7): 277-282.

[9] GIORIA M, O'FLYNN C, OSBORNE B A. A Review of the Impacts of Major Terrestrial Invasive Alien Plants in Ireland[J]. Biology & Environment Proceedings of the Royal Irish Academy, 2018, 118 (3): 157-179.

[10] 刘晖, 王晶慧, 吴小辉. 生境营造的实验性研究[J]. 中国园林, 2017, 33 (3): 19-23.

LIU H, WANG J M, WU X H. An Experimental Research Approach on the Habitat-Site Design[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33 (3): 19-23.

[11] 徐汝梅, 叶万辉. 生物入侵: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

XU R M, YE W H. Biological Invasion: Theory and Practice[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[12] 象伟宁, 王涛, 汪辉. 魅力的巴斯德范式 vs. 盛行的玻尔范式: 谁是生态系统服务研究中更具生态实践智慧的研究范式? [J]. 现代城市研究, 2018 (7): 2-6, 19.

XIANG W N, WANG T, WANG H. Pasteur's Quadrant: An Appealing Ecophronetic Alternative to the Prevalent Bohr's Quadrant in Ecosystem Services Research[J]. Landscape Ecology, 2018 (7): 2-6, 19.

[13] 万方浩, 谢丙炎, 杨国庆. 入侵生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

WAN F H, XIE B Y, YANG G Q. Invasion Biology[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[14] 李仓拴. 城市建成环境地被植物群落设计模式研究: 西安建筑科技大学实验与实践[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.

LI C S. Research on the Design Model of Urban Built up Environment Ground Cover Plant Community-Experimental and Practical Study at Xi'an University of Architecture and Technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

[15] DAVIS M A, GRIME P, THOMPSON K. Fluctuating Resources in Plant Communities: A General Theory of Invasibility[J]. Journal of Ecology, 2000, 88 (3): 528-534.

[16] STOHLGREN T J, BULL K A, OTSUKI Y, et al. Riparian Zones as Havens for Exotic Plant Species in the Central Grasslands[J]. Plant Ecology, 1998, 138 (13): 113-125.

[17] LARSON D L, ANDERSON P J, NEWTON W. Alien Plant Invasion in Mixed-Grass Prairie: Effects of Vegetation Type and Anthropogenic Disturbance[J]. Ecological Applications, 2001, 11 (1): 128-141.

[18] HOBBS R J, YATES S, MOONEY H A. Long-Term Data Reveal Complex Dynamics in Grassland in Relation to Climate and Disturbance[J]. Ecological Monographs, 2007, 77 (4): 545-568.

[19] WEDIN D A, TILMAN D. Influence of Nitrogen Loading and Species Composition on the Carbon Balance of Grasslands[J]. 1996, 274(5293): 1720-1723.

[20] RENNE I J, TRACY B F, COLONNA I A. Shifts in Grassland Invasibility: Effects of Soil Resources, Disturbance, Composition, and Invader Size[J]. Ecology, 2006, 87 (9): 2264-2277.

[21] HITCHMOUGH J. Sowing Beauty: Designing Flowering Meadows from Seed[M]. Portland: Timber Press, 2017.

[22] WEST C. Planting in a Post-Wild World: Designing Plant Communities for Resilient Landscapes[M]. Portland: Timber Press, 2015.

[23] NAEEM S, KNOPS J M H, TILMAN D, et al. Plant Diversity Increases Resistance to Invasion in the Absence of Covarying Extrinsic Factors[J]. Oikos, 2000, 91 (1): 97-108.

[24] 周宇峰, 周国模. 斑块边缘效应的研究综述[J]. 华东森林经理, 2007, 21 (2): 1-8.

ZHOU Y F, ZHOU G M. Summary of Research on Edge Effect of Patch[J]. East China Forest Management, 2007, 21 (2): 1-8.

[25] DARWIN C. The Origin of Species by Means of Natural Selection[M]. London: John Murray, 1859.

[26] ELTON C S. The Ecology of Invasions by Animals and Plants[M]. London: Butler and Tanner Ltd., 1958.

[27] FARGIONE J, BROWN C S, TILMAN D. Community Assembly and Invasion: An Experimental Test of Neutral Versus Niche Processes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100 (15): 8916-8920.

[28] RAINER T, WEST C. Planting in a Post-Wild World: Designing Plant Communities for Resilient Landscapes[M]. Timber Press, 2015.

[29] LI S P, JIA P, FAN S Y, et al. Functional Traits Explain the Consistent Resistance of Biodiversity to Plant Invasion Under Nitrogen Enrichment[J]. Ecology Letters, 2021, 25 (4): 778-789.

[30] 郑景明, 马克平. 入侵生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

ZHENG J M, MA K P. Invasion Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[31] KENNEDY T A, NAEEM S, HOWE K M, et al. Biodiversity as a Barrier to Ecological Invasion[J]. Nature, 2002, 417: 636-638.

[32] WISERS K, ALLEN R B, CLINTON P W, et al. Community Structure and Forest Invasion by an Exotic Herb over 23 Years[J]. Ecology, 1998, 79: 2071-2081.

[33] 姚向阳, 李委涛, 郑玉龙. 群落组成及物种间相互作用对外来植物入侵的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33 (7): 1953-1959.

YAO X Y, LI W T, ZHENG Y L. Effect of Community Composition and Species Interactions on the Invasion of Alien Plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33 (7): 1953-1959.

[34] WANG C Y, YU Y L, CHENG H Y, et al. Which Factor Contributes Most to the Invasion Resistance of Native Plant Communities Under the Co-invasion of Two Invasive Plant Species? [J]. Science of the Total Environment, 2022, 813: 152628.

[35] 马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系[J]. 生物多样性, 2006 (1): 21-28.

MA W H, FANG J Y. The Relationship Between Species Richness and Productivity in Four Typical Grasslands of Northern China[J]. Biodiversity Science, 2006 (1): 21-28.

[36] 孙国钧, 张荣, 周立. 植物功能多样性与功能群研究进展[J]. 生态学报, 2003 (7): 1430-1435.

SUN G J, ZHANG R, ZHOU L. Trends and Advances in Researches on Plant Functional Diversity and Functional Groups[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003 (7): 1430-1435.

[37] BYUN C, DE BLOIS S, BRISSON J. Plant Functional Group Identity and Diversity Determine Biotic Resistance to Invasion by an Exotic Grass[J]. Journal of Ecology, 2013, 101 (1): 128-139.

[38] BYUN C, DE BLOIS S, BRISSON J. Restoring Functionally Diverse Communities Enhances Invasion Resistance in a Freshwater Wetland[J]. Journal of Ecology, 2020, 108 (6): 2485-2498.

[39] MASON T J, KRISTINE F, JOLLEY D F, et al.

Functional Richness and Identity Do not Strongly Affect Invasibility of Constructed Dune Communities[J]. Plos One, 2017, 12 (1): 351-367.

[40] PRIEUR-RICHARD A H, LAVOREL S, GRIGULIS K, et al. Plant Community Diversity and Invasibility by Exotics: Invasion of Mediterranean Old Fields by *Conyza Bonariensis* and *Conyza Canadensis*[J]. Ecology Letters, 2010, 3 (5): 412-422.

[41] 国家牧草产业技术体系. 中国栽培草地[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

National Grassland Industry Technology System. Cultivated grasslands in China[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[42] 姚忠, 吴永明, 游海林, 等. 竞争-耐胁迫-杂草型植物对策理论及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42 (1): 24-36.

YAO Z, WU Y M, YOU H L, et al. Research Progress of Plant Competitor-Stress Tolerator-Ruderal (CSR) Theory and Its Application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (1): 24-36.

[43] YANG Z P, MINGGAGUD H, WANG Q, et al. Interacting Effects of Nitrogen Addition and Mowing on Plant Diversity and Biomass of a Typical Grassland in Inner Mongolia[J]. Agronomy, 2023, 13 (8): 2125.

[44] 吉普森. 禾草和草地生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.

GIBSON D J. Grass and Grassland Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.

[45] LECK M A, PARKER V T, SIMPSON R L. Ecology of Soil Seed Bank[M]. Cambridge, MA: Academic Press, 1989: 385-444.

[46] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. 植物生态学报, 2003 (4): 552-560.

YU S L, JIANG G M. The Research Development of Soil

Seed Bank and Several Hot Topics[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003 (4): 552-560.

[47] 李仓拴, 刘晖, 杨伊婷, 等. 西北干旱城市破碎化绿地生境的植物群落设计途径研究[J]. 风景园林, 2019, 26 (2): 88-93.

LI C S, LIU H, YANG Y T, et al. Plant Community Design Approaches for Fragmented Green Space Habitats in Northwest China Arid Cities[J]. Landscape Architecture, 2019, 26 (2): 88-93.

[48] 王晶懋, 刘晖, 吴小辉, 等. 基于场地小气候特征的草本植物群落设计研究[J]. 风景园林, 2018, 25 (4): 98-102.

WANG J M, LIU H, WU X H, et al. A Research on Herbaceous Plant Community Fabric Design Based on Site Microclimate Characteristic[J]. Landscape Architecture, 2018, 25 (4): 98-102.

[49] 刘晖, 李莉华, 徐鼎黄, 等. 自然环境条件影响下的西北城市绿地生境营造途径[J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2016, 48 (4): 556-561.

LIU H, LI L H, XU D H, et al. Approach for Urban Green Space Site-Habitat Design and Construction Method Based on the Natural Environment Conditions in North-West China[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48 (4): 556-561.

[50] HITCHMOUGH J, WAGNER M, AHMAD H, et al. Extended Flowering and High Weed Resistance Within Two Layer Designed Perennial "Prairie-Meadow" Vegetation[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 117-126.

[51] 冉海燕, 兰献敏, 陈仕红, 等. 果园以草治草研究进展[J]. 农技服务, 2019, 36 (2): 68, 70.

RAN H Y, LAN X M, CHEN S H, et al. Research Progress on

Grass Control in Orchards[J]. Agricultural Technical Services, 2019, 36(2): 68, 70.

[52] 许凯扬, 叶万辉. 群落可入侵性及环境胁迫[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11 (1): 75-82.

XU K Y, YE W H. Community Invasibility and Environmental Stress[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11 (1): 75-82.

图片来源(Sources of Figures):

图 1、2 由作者绘制。

(编辑 / 李清清)

作者简介:

李仓拴 / 男 / 博士 / 西北农林科技大学风景园林艺术学院讲师、硕士生导师 / 研究方向为城市生境与生物多样性营造、园林草本植物群落设计

张琼文 / 女 / 西北农林科技大学风景园林艺术学院在读硕士研究生 / 研究方向为植物群落设计

王菲 / 女 / 西北农林科技大学风景园林艺术学院在读硕士研究生 / 研究方向为植物群落设计

刘晖 / 女 / 博士 / 西安建筑科技大学建筑学院教授、博士生导师 / 本刊编委 / 研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法、中国地景文化历史与理论
通信作者邮箱: 249600425@qq.com

LI C S, ZHANG Q W, WANG F, LIU H. Invasion Resistance of Herbaceous Plant Community: Influence Mechanism and Design Strategy[J]. Landscape Architecture, 2024, 31(11): 79-85. DOI: 10.3724/j.fjyl.202309150424.

Invasion Resistance of Herbaceous Plant Community: Influence Mechanism and Design Strategy

LI Cangshuan, ZHANG Qiongwen, WANG Fei, LIU Hui*

Abstract:

[Objective] Weed control has always been a difficult problem for urban green space managers around the world. Weeds grow rapidly, which not only compete with flowers for nutrients, water and other resources, but also serve as the intermediate host of a variety of pests and diseases. Therefore, the poor control of weeds will surely affect the growth of flowers and plants. The current weed control methods mainly include manual weed removal, mulch cultivation and use, chemical weed control, etc., some of which are time-consuming and laborious or prone to cause environmental pollution, thus failing to achieve

efficient and ecological weed control. However, the biological control method is seldom used in garden green space, for which the main reason is that the survival mechanism between different species (such as adaptive relationship with the habitat, community structure, community composition, external interference, etc.) has not been transformed into operable rules and methods. The key to biological control is to improve the invasion resistance of plant community, which is also a key way to radically reduce the cost of weed control. Relevant research on the mechanism of invasion resistance, the core content of invasion ecology research, has revealed a large number of underlying rules.

However, such research has neither systematically sorted out the influence mechanism on community invasion resistance nor designed the application and transformation of the aforesaid rules, making it difficult to really realize the value of guidance of invasion resistance for community design.

[Methods] Through literature analysis, this research sorts out the influence mechanism of community invasion resistance, and puts forward relevant strategies for improving community invasion resistance from the perspective of landscape architecture. This research systematically analyzes the ecological factors affecting the invasion resistance of herbaceous plant community and their relationship with community invasion resistance in ecological research, and transforms them into the design strategies for improving community invasion resistance from the perspective of landscape architecture.

[Results] The invasion resistance of herbaceous plant community is influenced by a combination of factors such as habitat, community structure, community composition and disturbance, with community composition is the main influencing factor. Different factors have different impacts on the invasion resistance of herbaceous plant community, and communities composed of different species vary greatly in invasion resistance. 1) In terms of habitat, shady habitats perform best in invasion resistance, seconded by semi-aerobic habitats, while positive habitats perform worst; invasion is likely to occur in areas and years with relatively abundant rainfall; invasion is generally more likely to occur in fertile soils with relatively high carbon, nitrogen, and phosphorus contents. 2) In terms of community structure, increasing the number of community layers can help enhance the invasion resistance; when an invaded site has native species overlapping with the ecological niches of exotic species, it will be difficult for the exotic species to invade. 3) In terms of community composition, some special species in a plant community can increase the community's invasion resistance; in general, the invasion resistance of a community is positively correlated with the number of species in the community; the higher the diversity of functional groups in a community, the stronger the community's invasion resistance; theoretically, the edge area of a community is less resistant to disturbance, where the interface is prone to mutation, indicating that the edge area is less resistant to invasion. 4) In terms of disturbance, mowing can significantly reduce interspecific competition in a community, thus increasing the community's invasion resistance; fire can reduce the seeds and propagules of weeds and inhibit the invasive disturbance of weed seeds on the community; gravel mulching can effectively reduce the germination of light-dependent weed seeds in the soil; and the fewer the species in the seed bank and the seed rain, the lower the possibility of community invasion.

[Conclusion] Therefore, the mechanism of community invasion resistance can be transformed into specific design strategies for invasion resistance enhancement such as habitat creation, community design, pathway establishment, and management and maintenance through the association of ecological and design variables. By creating herbaceous plant community from the four aspects of site habitat, community structure, community composition and disturbance relationship, the invasion resistance of a community can be

effectively improved, so that the community can inhibit or influence the growth of surrounding weeds through its own "immune" system, without introducing chemicals that are difficult to degrade into the system or causing environmental problems related to chemical pesticides, while reducing the production cost, which can help promote the sustainable development of urban herbaceous plant community. Further, this research confirms that the basic theories of ecology can be converted into design-guided methods, and the key lies in the association between ecological variables and design variables, which is one of the "bridges" to realize the intersection of ecology and landscape architecture. However, this research decomposes the complex community system into single factors and simply considers the single-factor effect on species, which makes the research limited to a certain extent. In the future, it is supposed to take into account more composite factor variables to elucidate the mechanism of species coexistence and community invasion resistance, so as to better solve the problem of weeds in urban gardens.

Keywords: landscape architecture; plant community design; invasion resistance; invasion ecology; weeds; ecological design

Authors:

LI Cangshuan, Ph.D., is a lecturer and master's supervisor in the College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University. His research focuses on ecological design for arid and semi-arid cities, and urban plant community design.

ZHANG Qiongwen is a master student in the College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University. Her research focuses on plant community design.

WANG Fei is a master student in the College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University. Her research focuses on plant community design.

LIU Hui, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, and an editorial board member of this journal. Her research focuses on theory and method of landscape planning and design for fragile ecological environments in northwest China, and history and theory of Chinese landscape culture.

Corresponding author Email: 249600425@qq.com