郭雅婷，李运远 . 基于生物多样性的城市绿地植物群落构建途径 [J]. 风景园林，2022，29（1）：59-63.

基于生物多样性的城市绿地植物群落构建途径

Construction Paths of Plant Communities in Urban Green Space Based on Biodiversity

郭雅婷 李运远 *

GUO Yating, LI Yunyuan*

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2022)01-0059-05
DOI：10.14085/j.fjyl.2022.01.0059.05
收稿日期：2021-06-30
修回日期：2021-11-11

郭雅婷 / 女 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计
GUO Yating is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design.

李运远 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院教授、博士生导师 / 研究方向为风景园林规划设计与工程技术
通信作者邮箱 (Corresponding author Email)：lyy0819@126.com
LI Yunyuan, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning, design and engineering technology.

摘要：当前城市化发展迅速，生物多样性日益受到威胁，城市绿地植物群落稳定性差，将直接影响其生态功能的发挥。对城市绿地植物群落的主要生态功能、稳定性及其关系进行阐释，论述了生物多样性影响群落稳定性的生物途径和非生物途径。在已有关于城市街区尺度生物多样性指标的研究基础上，提出城市绿地植物群落构建的原则，并基于生物多样性对城市绿地植物群落稳定性的作用机制，总结了高稳定性城市绿地植物群落的构建方法：1）从生物途径，选择具有优势性状的物种，选择可保证多种性状协同发展的结构和物种搭配；2）从非生物途径，选择合适的、抗干扰能力强的植物群落结构、物种及立地条件，为动植物构建适宜的小生境，同时实现群落中动植物对资源的高效利用。以期为中国城市绿地生态效能提升及植物群落的构建提供方法参考。

关键词：风景园林；生物多样性；城市绿地；植物群落；生态功能；群落稳定性；群落构建方法

基金项目：北京市重点研发计划（编号 D171100007117003）

Abstract: With the rapid development of urbanization, biodiversity is increasingly threatened, and the poor stability of urban green plant communities will directly affect the performance of its ecological functions. It also directly affects the self-regulation of urban ecological functions. This research briefs the main ecological functions, stability and relationship of the urban green space plant communities, and explores the biological and non-biological pathways through which biodiversity affects the stability of the communities. Based on the existing researches on biodiversity indicators at the urban block scale, it proposes the principles for constructing urban green space plant communities, and based on the mechanism of biodiversity affecting the stability of urban green space plant communities, sums up the ways of constructing highly stable urban green space plant communities. 1) From the biological approach, it selects the species with dominant traits, and the structures and species collocations that can ensure coordinated development of multiple traits. 2) From the non-biological approach, select the appropriate and strong anti-interference structure, species and site conditions to build a suitable niche for animals and plants, and at the same time realize the efficient use of resources for animals and plants in the community. The ultimate goal of this research is to provide a method reference for the improvement of the ecological efficiency of urban green space and the construction of plant communities in China in the future.

Keywords: landscape architecture; biodiversity; urban green space; plant community; ecological function; community stability; community construction method

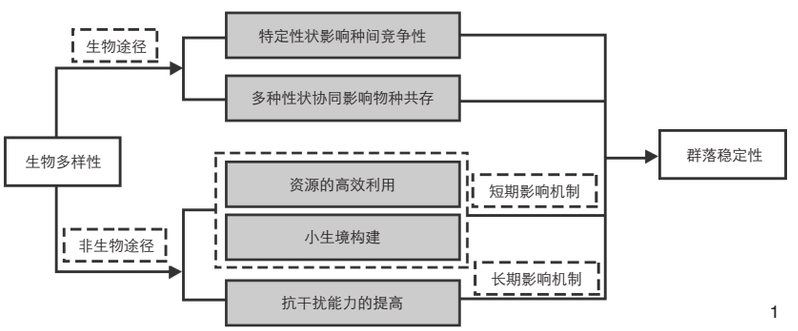
Fund Item: Beijing Key Research and Development Program (No. D171100007117003)

城市绿地在改善城市生态环境和提供生态系统服务中具有重要作用[1]。然而，随着城市建成区面积的不断扩大，绿地占比不断缩小，城市生态系统遭到破坏。且当前城市绿地植物群落的设计大多依据人类偏好，为追求空间塑造及视觉艺术性，多采用人工配植的方式，造成一些伪生态局面。目前已有学者关注到这类问题并开始从生态学角度对近自然植物群落设

表 1 城市绿地植物群落功能性状与生态系统服务的关系 [9]

Tab. 1 The relationship between functional characters of plant communities and ecosystem services[9]

城市绿地植物群落功能性状	生态系统服务
部分植物的根、茎、叶、花、果实可以为人类提供食物	食物生产
部分植物可以提供木材、橡胶及纤维制品等工业原料	工业原料供应
部分单种植物或多种植物配合可直接或通过成分提取制成药用品	药品生产
植物群落利用太阳能，将无机物质合成有机物质，为动物和微生物等提供食物和生活场所	有机物质的生产
植物群落通过光合作用和呼吸作用与大气交换 CO_2 和 O_2	维持碳氧平衡
植被及枯枝落叶层的覆盖，可以减少表土损失量、维持土壤肥力、减少风沙灾害等	水土保持
植物根系深入土壤，提高土壤渗透性；植物地上部分也可使径流变得缓慢且均匀	涵养水源
植物抗性范围内能通过吸收分解而减少空气中有害物质的含量；且大部分植物有滞尘作用	净化空气
植物群落有明显的降温增湿作用，可以很好地缓解热岛效应	调节气候
植物通过传粉、异花受精的繁殖功能以及种间相互作用，促进地球生命系统进化发展	维持进化过程
植物群落粗糙的枝叶可以很好地吸收噪声，其良好生态功能的发挥可减少灾害发生的频率	减灾降噪



1 生物多样性影响植物群落稳定性的作用途径

Pathways of biodiversity affecting plant community stability

计 [2]、近自然园林 [3] 等做出探索。

生物多样性对群落稳定性及功能动态变化起着关键作用，有利于人与环境和谐共存，这一思想理念已经成为学术界共识 [4]。许多研究指出，生物多样性高的群落有着较高的抵抗力和恢复力，因此更易维持稳定状态 [5]。在生物多样性降低过程中，物种的减少会降低植物群落对太阳能的捕获量，从而对物质循环速率产生影响，降低群落生产力 [6]。因此，探讨生物多样性影响群落稳定性的作用机制，对从根本上理解植物群落如何维持稳定状态并高效发挥生态功能有重要意义，有利于进一步提出针对性的植物群落构建方法。

1 城市绿地植物群落的生态功能及稳定性

植物群落是指在某一地段内，具有相对数量比例和特定结构的多种植物组合 [7]，按形成方式可分为自然植物群落和人工植物群落 [8]。城市绿地植物群落多属于人工植物群落，支撑着城市重要的生态功能，它作为生态系统最基础和最关键的组成部分，是食物链消费者和还原者的能量来源，决定着基本有机体的生活和繁荣，通过驱动能量流动和物质循环实现生态系统服务 [9]。城市绿地植物群落的功能性状在相当程度上决定了其在城市中的自然生态系统服务类型 [10]（表 1）。

群落稳定性是指群落在一段时间内能够维持物种间相互作用稳定及物种与气候等非生物环境间均衡状态的能力 [11]。自然界中的植物群落经过系列演替成为顶级群落后，便可维持相对稳定的状态，此时的植物群落种间相互依存联系增强，物质循环与能量流动的可能途径增多并趋于稳定，植物群落生产率逐渐增大而接近饱和。换而言之，达到稳定状态的植物群落能够更好地发挥生态功能进而提供更有效的生态系统服务 [12]。

而城市生态环境在很大程度上限制了植物的生长发展，多数植物群落结构简单、稳定性低。而生态危机也有逐年加重的趋势，人类已然意识到高稳定性植物群落在维持基本生态过程、确保物种和生态系统的持续发展方面发挥的正向作用，因而设计高稳定性的城市园林植物群落成为当前较为科学合理的走向。

2 生物多样性影响城市绿地植物群落稳定性的主要途径

生物多样性是指生物及其与环境形成的生态综合体，其中也包含了与生物相关联的各种生态过程的总和 [13]，是植物群落稳定的重要保障。由于物种之间复杂的相互作用，生物多样性可以通过生物途径，即物种性状及个体生理生态特性来直接影响植物群落稳定性；也可以通过非生物途径，即资源的高效利用（生态位互补假说）、小生境构建（种间正相互作用、生物与环境相互作用）及抗干扰能力的提高（保险效应）等来维持植物群落稳定状态 [14-15]（图 1）。

2.1 生物途径

与简单植物群落相比，生物多样性高的复杂群落更有可能包含高产物种 [16]，且多种植物可通过特定性状或多种性状协同，更易使群落维持稳定 [17]。Kunstler 等 [18] 发现植物性状与种间竞争关系表现出较高的相关性，且不同性状间的协同对于种间竞争和促进物种共存有重要影响。多项研究表明同一植物群落的功能与演变过程受植物物种性状组合影响 [19]，正是植物多种性状的协同使得群落能实现长期生存与繁衍，保证了植物群落高效生产力的输出。

2.2 非生物途径

“生态位互补假说”很好地说明了生物多样性高的植物群落可以更加充分和高效地利用资源。该假说认为，由于生态位差异，高生物多样性群落中的生物能够占有更广范围的“功能空间”[20]，种间关系更易保持稳定，群落的资源利用效率得到提高，其生产力能够维持在较高的水平 [21]。

植物群落中某些物种之间存在正相互作用关系，这使得一些物种会给另外一些物种构造微生境、小气候环境及提供保护屏障等。

因此生物多样性高的群落内，各个物种之间存在正相互作用的概率增加，更有利于提高群落稳定性。

“铆钉假说”认为生物多样性高的植物群落稳定性强、抗干扰能力强[22]。虽然在生物多样性降低的初期，植物群落生态功能不会有较大变化，但当物种数量低于某一值后，植物群落内任何物种的损失都会对其功能产生严重的影响[23-24]。在变化的环境中，生物多样性高的植物群落则可以为其功能的损失提供一定的缓冲，具有“保险效应”[25]，从而增强群落的稳定性。

3 基于生物多样性的城市绿地植物群落构建原则与方法

3.1 构建指标和原则

随着全球范围对生物多样性保护达成广泛共识，各国纷纷建立了生物多样性评估指标体系。有学者通过分析国际上广泛使用的新加坡指标[26]、日本指标[27]，以及后来发展的中国指标[28]，提取出城市街区尺度的生物多样性评价指标，包含：本土生物多样性（鸟类、蝴蝶、维管植物物种）、外来入侵物种的比例、休闲教育及生态服务功能、养护管理制度、投入预算5项评价指标[29]。再结合植物群落生态学理论，提出6项城市绿地植物群落构建原则：1）具备鸟类、蝴蝶等动物栖息的条件；2）外来物种比例适宜；3）景观构成丰富多样；4）突出地域性生物多样性风格；5）群落稳定性高，可高效发挥生态功能；6）满足低维护管理需要。

3.2 构建方法

本研究在遵循植物群落构建原则（即提升生物多样性）的基础上，基于生物多样性对城市绿地植物群落稳定性的作用机制，从生物多样性角度提出城市绿地中高稳定性的植物群落的构建方法（表2）。

表2 基于生物多样性的城市绿地植物群落构建方法

Tab. 2 Construction method of plant communities in urban green space based on biodiversity

作用途径	作用机制	构建方法
生物途径	特定性状影响种间竞争	选择具有优势性状的物种
	多种性状协同影响物种共存	选择可保证多种性状协同发展的结构和物种
非生物途径	资源的高效利用	选择可实现群落中动植物高效利用资源的结构
	小生境构建	选择可为动植物构建小生境的结构、物种及立地条件
	抗干扰能力的提高	选择抗干扰能力强的结构

2

2 北京林业大学“林之心”近自然草本植物群落
The near-natural herbaceous plant communities of the “Heart of Forest” in Beijing Forestry University

2-1 直立式生长
Upright growth

2-2 匍匐式蔓延
Creeping and spreading

3.2.1 基于生物途径的构建方法

3.2.1.1 选择具有优势性状的植物——乡土植物

乡土植物经过长期的自然选择及物种演替后，在特定地区的环境中有高度生态适应性[30]，其特有的性状在竞争中具有绝对优势。其果实成熟期与本土动物迁徙期或繁殖期基本一致，因此能为本土动物提供如花蜜、果实、汁液等较优的食宿资源，经过长期的自然选择，动物更倾向于在乡土树种上取食、栖息和停留[31-32]。因此，运用乡土植物能营造出生物多样性更高的生境。同时，利用原生乡土植物还可以突出植物景观的地域风格。

3.2.1.2 选择可保证多种性状协同发展的植物种和结构

1）实现草本植物间的性状协同——控制种植密度。性状单一的植物群落抗性较差，群落要实现长期的生存、繁衍，须多种性状协同。就草本植物而言，当前多数设计师经常会持有教条化的生态主义观点，如精心设计株距，虽然使得每一株植物都有足够的生长空间，但植株之间缺失了关联，致使外观上缺乏生机。

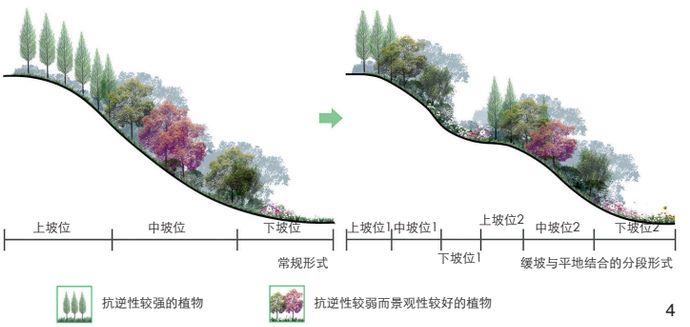
植物设计时可通过撒播等形式营造观赏性草本植物群落[33]，推广使用近自然式的草本植物群落种植方式（图2）。使植物群落可利用种间相互关系进行“自我稀疏”式演替，维持群落稳定适宜。同时在选择植物种类时，要注意保证其生产力大致等价，且生产力明显较高的植物使用量需控制在较低水平[34]，以减少后期人工维护。

2）实现外来植物与乡土植物的多性状协同——合理引种。引进生态位相似的外来植物代替本地某些具有生长缓慢、病虫害严重等缺陷的劣势植物，与本地优势植物物种性状相协同促进物种共存。但须注意引入恰当的植物种类，防止造成外来物种迅速扩散，威胁城市生物多样性的后果[35]。合理选用外来植物，应充分考虑气候、地理条件、季节等要素，克服引种外来植物的盲目性，提高引种驯化的成功率[36]。此外，在栽植外来植物之前，需要对将要引种的苗木进行检疫[37]，并调查其逸出状况。

3.2.2 基于非生物途径的构建方法

3.2.2.1 选择可实现群落中动植物高效利用资源的结构

1）实现树木高效利用资源——控制乔木种植密度。各类种内、种间的不利关系可能会引发植物对营养空间的激烈竞争，进而造成树木分化和死亡等，为避免这一现象，园林树木的配置应采取较大的种植株距。低密度的生长空间可使园林树木迅速生长并保持良好的树形[38]，更利于植物种子的传播。大量喜光的先锋植物种随机迁入到较小郁闭度的植物群落定居，有利于群落物种丰富度及



3 北京林业大学“林之心”人工林窗下的生机盎然
The vibrant scene under artificial forest window of the “Heart of Forest” in Beijing Forestry University

4 缓坡与平地结合的分段形式小生境构建剖面图
Sectional diagram of niche construction in the form of combination of gentle slope and flat land

稳定性的提高[39]。

2）实现林下动、植物高效利用资源——预留人工林窗。由于林下植物常被成排种植的高大乔木遮挡，环境资源利用率较低。林窗作为植物群落中的一种小尺度干扰机制，是促进群落演替更新，加快养分循环的主要动力[40]，对维持群落生物多样性具有重要作用。改善林窗的光照及温湿度条件，可提升林下植物利用资源的效率，为植物生长发育提供适宜的条件，更有利于高位芽植物的定居生长，同时为动物及鸟类提供重要的活动条件，实现生态位互补[41]。

林窗面积是限制林下植物生长发育的主要条件，林窗面积越大，到达树林下层的光照越多，对林下生境多样性的促进作用就越大[42]。同时，林窗面积越大，内部空间就越复杂，林下环境异质性也越高，且其具有强烈的边缘效应来丰富资源生态位，使阳生与半阴生植物在林窗内得以共存[43]，提高了群落稳定性。因此，在城市绿地植物群落的构建时，应结合立地条件，预留大小不一且形状多样的人工林窗，丰富资源生态位，提高群落的稳定性（图 3）。

3.2.2.2 选择可为动植物构建小生境的群落结构、物种及立地条件

1）为动物构建适宜生境——增选食源植物、构建乔灌草复层结构。植物群落作为生态系统中的生产者，丰富的植物种类能为动物提供良好的食物来源和生存环境，而动物的生存活动也影响植物生长发育的全过程。土壤中的动物通过粉碎、翻动土壤和分解有机质，有利于提高植物对土壤养分的利用效率[44]。有些动物以树木的种子为食，同时成为种子的传播者，因此动物与植物的良性互动循环有利于群落维持稳定。考虑增加蜜源、食源植物种类，以吸引鸟虫[45]，并适当增加常绿型食源树种的比例[46]，同时注意食源植物在空间范围内的均匀分布，保证物质供应在时间和空间上的均衡性[47]。

树种多样的阔叶林能形成高低不同的林冠层，为鸟类提供了更多的生存空间，提高鸟类群落的多样性[48]；林下丰富的草本植物和灌木则为各类昆虫提供了多样的食宿场所，因此，复层垂直群落结构对植物群落的生物多样性具有重要意义。在种植设计时可通过植物分层来实现植物群落的功能多样性和弹性缓冲。可模拟天然植物群落结构，注意考虑各类植物的生态习性，合理配置，确保所选植物种在垂直空间中的和谐共生关系。

2）为植物构建适宜的小生境——塑造立地条件。无机环境的改变会通过光照、温度、土壤养分等生态因子影响各植物种的生长发育及空间分布，进而影响群落生产力[49]。而在同一气候区，植物的立地条件在很大程度上决定了各生态因子的不同。地面起伏变化形成不同的坡向和坡位，再加上风向、水分等微气候条件的影响，使表层土土壤特性不同，从而在小范围内形成明显的异质性生境，有利于局部区域范围内植物群落生物多样性的形成与维持[50]。阳坡光照强度大，地表温度高，表层土壤水分蒸发较快，不利于大多数阴生及半阴生植物的生长和发育[51]；阴坡土壤水分和养分条件则相对较好，因此，具有微地形的阳坡更适合设置供人活动的大草坪，而阴坡可种植多种喜阴植物，营造生物多样性丰富的植物群落景观。

就坡位而言，有研究表明，坡顶的土壤腐殖质层厚度低，受干扰程度强，不利于植物生长发育[52]，在坡顶部天然生长的植株通常比坡中、下部矮小，因此植物群落的设计中，可在坡顶部种植抗逆性较强的植物，在坡中、下部种植抗逆性稍弱但景观效果好的植物，同时结合缓坡与平地，缩减条件恶劣的坡顶部区域（图 4），即克服上坡位的不利条件，利用下坡位的有利因素，塑造更适宜植物群落生长发育的立地条件，提高植物群落的稳定性。

3.2.2.3 选择抗干扰能力强的结构——构建年龄冗余结构

抗干扰能力强的群落更稳定。年龄结构表示各年龄段植物在群落中的位置及数量情况。当上层空间中的老龄植物衰老或遭受干扰死亡时，下一层次中处于预备状态的中幼树能够迅速生长并代替上层植物，使受干扰的群落恢复如初，这种可避免上层植物组成发生颠覆性更替的群落结构便称为年龄冗余结构[53]。显然，年龄冗余结构使得植物群落具有较高的恢复力和抵抗力，对维持群落的稳定性具有重要作用。

因此，植物设计师有必要考虑在优势种之下的层次中安排一定数量的“中幼群”，构建年龄冗余结构，使得植物群落在必要时能进行有效的“自我复制”，以维持稳定。

4 挑战与总结

4.1 挑战

园林工作者在城市中推行这一群落构建方法，可能会面临以下两方面的挑战。一方面是苗木供应商和施工企业理念固化，他们更关注于装饰性、珍稀品种苗木的运用，种

植设计师应通过与其耐心沟通、宣传教育等方式，逐步转变其固有观念，使其认识到生态性和功能性植物品种的重要性；另一方面，城市化的快速发展，使得城市居民较难获取长时间接触自然的机会，难以欣赏纯自然的野性美。设计师可在构建生态植物群落时兼顾植物群落的观赏性，如通过适当加入季节性色彩植物、降低视觉凌乱度等，循序渐进地引导公众改变审美偏好。

4.2 总结

本研究从生物多样性的角度出发，提出高稳定性城市绿地植物群落的构建方法，对实现城市绿地植物群落高效发挥生态功能意义重大，也在根本上响应了国家对于生物多样性的保护政策。但本研究的探讨相对较为宽泛，今后还需进行更为细致的研究。如对不同类型的生境（城市湿地、城市棕地中的修复型生境等）展开详细研究；精确研究针对特定绿地的植物种类、年龄、数量等，以期为城市绿地植物群落构建提供更坚实的研究基础。

参考文献 (References)：

[1] GODDARD M A, DOUGILL A J, BENTON T G. Scaling up from Gardens: Biodiversity Conservation in Urban Environments[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2010, 25(2): 90-98.

[2] 任斌斌，商茹，李芳，等 . 北京城市绿地近自然植物群落构建 [J]. 生态学杂志，2019，38（10）：2911-2917.

[3] 袁梦 . 自然观视角下近自然园林理论研究 [D]. 杭州：浙江理工大学，2019.

[4] 刘玉平，万华伟，彭羽，等 . 生物多样性贡献人类福祉的研究进展 [J]. 环境生态学，2021，3（5）：43-48.

[5] 王加国，李苇洁，张红军，等 . 贵州百里杜鹃景区植物群落多样性与稳定性研究 [J]. 林业资源管理，2020（2）：122-127.

[6] 方升佐，田野 . 人工林生态系统生物多样性与生产力的关系 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版)，2012（4）：1-6.

[7] 宋永昌 . 植被生态学 [M]. 上海：华东师范大学出版社，2001：22-25.

[8] 王旭东，杨秋生，张庆费 . 国内城市绿地人工植物群落结构的研究现状与展望 [C]//中国风景园林学会 2017 年会论文集 . 北京：中国建筑工业出版社，2017：5.

[9] MACE G M, NORRIS K, FITTER A H. Biodiversity and Ecosystem Services: A Multilayered Relationship[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2012, 27(1): 19-26.

[10] 欧阳志云，王效科，苗鸿 . 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究 [J]. 生态学报，1999（5）：19-25.

[11] 张继义，赵哈林 . 植被 (植物群落) 稳定性研究评述 [J]. 生态学杂志，2003（4）：42-48.

[12] 赵志模，郭依泉 . 群落生态学原理与方法 [M]. 重庆：科学技术文献出版社，1990：165-169.

[13] SONG G E. What Determines Species Diversity?[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(19): 2033-2041.

[14] 苏宏新，马克平 . 生物多样性和生态系统功能对全球变化的响应与适应：协同方法 [J]. 自然杂志，2010，32（5）：272-280.

[15] 李奇，朱建华，肖文发 . 生物多样性与生态系统服务：关系、权衡与管理 [J]. 生态学报，2019，39（8）：2655-2666.

[16] 江小雷，张卫国，严林，等 . 植物群落物种多样性对生态系统生产力的影响 [J]. 草业学报，2004（6）：8-13.

[17] 何念鹏，刘聪聪，张佳慧，等 . 植物性状研究的机遇与挑战：从器官到群落 [J]. 生态学报，2018，38（19）：6787-6796.

[18] KUNSTLER G, FALSTER D, COOMES D A, et al. Plant Functional Traits Have Globally Consistent Effects on Competition[J]. Nature, 2016, 529(7585): 204-174.

[19] 刘晓娟，马克平 . 植物功能性状研究进展 [J]. 中国科学：生命科学，2015，45（4）：325-339.

[20] TILMAN D, THOMSON K T, LEHMAN C L. Plant Diversity and Ecosystem Productivity: Theoretical Considerations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(5): 1857-1861.

[21] WARDLE D A, BONNER K I, BARKER G M. Stability of Ecosystem Properties in Response to Above-Ground Functional Group Richness and Composition[J]. Oikos, 2000, 89(1): 11-23.

[22] 汪殿蓓，暨淑仪，陈飞鹏 . 植物群落物种多样性研究综述 [J]. 生态学杂志，2001（4）：55-60.

[23] CARDINALE B J, DUFFY J E, GONZALEZ A, et al. Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity[J]. Nature, 2012, 489(7401): 59-67.

[24] 张景慧，黄永梅 . 生物多样性与稳定性机制研究进展 [J]. 生态学报，2016，36（13）：3859-3870.

[25] 张全国，张大勇 . 生物多样性与生态系统功能：进展与争论 [J]. 生物多样性，2002（1）：49-60.

[26] National Parks Board Singapore. User's Manual of the Singapore Index on Cities' Biodiversity[EB/OL]. (2014-07-16)[2021-11-10]. https://www.nparks.gov.sg/~/media/nparks-real-content/biodiversity/singapore-index/users-manual-on-the-singapore-index-on-cities biodiversity.pdf.

[27] 日本国土交通部．城市生物多样性指标 (简易版)[EB/OL]．(2018-06-16) [2021-11-10]. http://www.mlit.go.jp/common/001152339.Pdf.

[28] 王琦，史娜娜，韩煜，等 . 中国陆域生物多样性综合评估指标体系构建 [J]. 应用生态学报，2021，32（8）：2773-2782.

[29] 薛竣桓，王云才，陈春谛 . 新加坡和日本城市生物多样性指标的借鉴与启示 [J]. 中国城市林业，2021，19（1）：31-35.

[30] 孙卫邦 . 乡土植物与现代城市园林景观建设 [J]. 中国园林，2003（7）：63-65.

[31] 谭玛丽，张健，魏彩霞 . 城市公园：城市生物多样性契机：原生乡土植被覆盖城市指导原则 [J]. 中国园林，2011，27（7）：63-67.

[32] 李树华 . 建造以乡土植物为主体的园林绿地 [J]. 中国园林，2005，21（1）：50-53.

[33] HITCHMOUGH J D, FLEUR M. Establishing North American Prairie Vegetation in Urban Parks in Northern England: Effect of Management Practice and Initial Soil Type on Long Term Community Development[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 78(4): 386-397.

[34] 希契莫夫，刘波，杭烨 . 城市绿色基础设施中大规模草本植物群落种植设计与管理的生态途径 [J]. 中国园林，2013，29（3）：16-26.

[35] 丛日晨，张颢，陈晓 . 论生物入侵与园林植物引种 [J]. 中国园林，2003，19（3）：32-35.

[36] 王爱民，李新国 . 试论城市绿化中乡土植物与外来植物的互补性 [J]. 广西园艺，2008，19（2）：24-25.

[37] 赵艳格 . 浅谈园林植物的引种驯化 [J]. 园艺与种苗，2012（3）：19-20，30.

[38] 《园林植物生态学》编写组 . 园林植物生态学 [M]. 北京：中国林业出版社，1999：66-70.

[39] 赵燕波，张丹桔，张健，等 . 不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性 [J]. 应用与环境生物学报，2016，22（6）：1048-1054.

[40] 谭辉 . 林窗干扰研究 [J]. 生态学杂志，2007，26（4）：8.

[41] 李强，王彬，邓云，等 . 西双版纳热带雨林林窗空间分布格局及其特征指数与林窗下植物多样性的相关性 [J]. 生物多样性，2019，27（3）：273-285.

[42] 陈力，刘国华，刘丹，等 . 亚高山针叶林不同大小林窗植物多样性及其海拔动态 [J]. 中南林业科技大学学报，2017，37（10）：90-97.

[43] 肖洒，吴福忠，杨万勤，等 . 川西高山森林生态系统林下生物量及其随林窗的变化特征 [J]. 生态环境学报，2014，23（9）：1515-1519.

[44] 徐璇，王维枫，阮宏华 . 土壤动物对森林凋落物分解的影响：机制和模拟 [J]. 生态学杂志，2019，38（9）：2858-2865.

[45] 隋金玲，张香，胡德夫，等 . 北京绿化隔离地区鸟类群落与环境因子关系研究 [J]. 北京林业大学学报，2007，55（5）：121-126.

[46] 徐一丁，杨子蕾，李运远 . 北京市城市边缘区通风廊道型林地营建方法研究：以黑庄户地区为例 [J]. 北京林业大学学报，2020，42（2）：135-148.

[47] 陆祎玮，唐思贤，史慧玲，等 . 上海城市绿地冬季鸟类群落特征与生境的关系 [J]. 动物学杂志，2007（5）：125-130.

[48] 赵欣如，房继明，宋杰，等 . 北京的公园鸟类群落结构研究 [J]. 动物学杂志，1996（3）：17-21.

[49] 刘旻霞，马建祖 . 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应 [J]. 应用生态学报，2012，23（12）：3295-3300.

[50] 张庆，牛建明，BUYANTUYEV A，等 . 不同坡位植被分异及土壤效应：以内蒙古短花针茅草原为例 [J]. 植物生态学报，2011，35（11）：1167-1181.

[51] 汝海丽，张海东，焦峰，等 . 黄土丘陵区微地形对草地植物群落结构组成和功能特征的影响 [J]. 应用生态学报，2016，27（1）：25-32.

[52] 程积民，程杰，杨晓梅，等 . 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征 [J]. 生态学报，2012，32（1）：226-237.

[53] 党承林 . 植物群落的冗余结构：对生态系统稳定性的一种解释 [J]. 生态学报，1998，18（6）：103-110.

图表来源 (Sources of Figures and Tables)：

图 2、3 由作者拍摄；表 1 引自参考文献 [9]；其余图表均由作者绘制。

（编辑 / 李清清）