

青岛不同城市公园木本植物对群落 β 多样性的贡献

Contribution of Woody Plants to β Diversity in Different Urban Parks of Qingdao

张式雷¹ 张良振¹ 李春林^{1*} 王志康^{1,2} 孙琳婷¹ 曹志泉¹ 孙佳丽¹ 秦青³ 范培先⁴
ZHANG Shilei¹ ZHANG Liangzhen¹ LI Chunlin^{1*} WANG Zhikang² SUN Linting¹ CAO Zhiquan¹ SUN Jiali¹ QIN Qing³
FAN Peixian⁴

(1. 青岛冠中生态股份有限公司, 青岛 266102; 2. 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨陵 712100; 3. 建设部中国公园协会, 北京 100044; 4. 青岛市园林和林业综合服务中心, 青岛 266003)

(1. Qingdao Greensum Ecology Co., Ltd, Qingdao, Shandong, China, 266102; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agrienvironment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi, China, 712100; 3. Ministry of Construction China Park Association, Beijing, China, 100044; 4. Qingdao City Bureau of Parks and Woods, Qingdao, Shandong, China, 266003)

文章编号: 1000-0283(2024)07-0097-011
DOI: 10.12193/j.laing.2024.07.0097.012
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-12-18
修回日期: 2024-04-01

摘要

为衡量城市公园中木本植物的分布及物种构成对城市绿地生态系统植物多样性的影响和重要性,以青岛太平山公园及其周边小型公园的木本植物群落为研究对象,运用植物群落二元丰富度的方差分解法探讨物种对研究区域 β 多样性的贡献(SCBD)和样地对研究区域 β 多样性的贡献(LCBD),进一步分析了单一物种、不同科类、不同植物类型及不同园区对 β 多样性的相对重要性。主要结果:单一物种对群落 β 多样性的影响与其在不同园区出现的机会相关,出现频数过高的优势树种和出现频数过低的弱势树种对群落 β 多样性的贡献均较低,而出现频数居中的树种如朴树(*Celtis sinensis*)、榉树(*Zelkova serrata*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)等木本植物对群落 β 多样性的贡献最高;木本植物群落中的优势科如蔷薇科(Rosaceae)、柏科(Cupressaceae)、松科(Pinaceae)、无患子科(Sapindaceae)对群落 β 多样性有重要贡献,其科类下的物种组成数量较高,同时物种独特性程度也较高;青岛城市公园的木本植物类群以落叶阔叶树种为主,从整体上看,落叶植物的SCDB值高于常绿植物,阔叶植物的SCDB值高于针叶植物,但从个体水平上看,落叶树种的SCBD平均值低于常绿树种,阔叶树种的SCBD平均值低于针叶树种,虽然常绿植物或针叶植物的物种丰富度较低,但物种独特性较高,具有较高的保护价值;中中山公园对群落 β 多样性的贡献度最大,LCBD值与园区的物种丰富度呈正相关关系。应加强保护物种丰富度较高的公园,同时利用不同园区的环境异质性增加木本植物的独特性这对保护城市绿地植物多样性具有重要价值。

关键词

城市公园; 木本植物群落; 物种组成; β 多样性

Abstract

To evaluate the influence and importance of woody plants' distribution and species composition in urban parks on the plant diversity of urban green space ecosystems, the woody plant communities in Taiping Mountain Park and its surrounding small parks in Qingdao City were studied. The variance decomposition method of the bivariate richness of plant communities investigated the contribution of species to β Diversity (SCBD) and plots to β diversity (LCBD). The relative importance of single species, families, plant types, and parks to β diversity was further analyzed. The main results: The influence of single species on β diversity was related to its occurrence in different parks. The dominant tree species with a high frequency of occurrence and the weak tree species with a low frequency of occurrence had lower contributions to β diversity. The most frequent tree species, such as *Celtis sinensis*, *Zelkova serrata*, and *Pistacia chinensis*, contributed most to β diversity. The dominant families in the woody plant community, such as Rosaceae, Cupressaceae, Pinaceae, and Sapindaceae, made essential contributions to β diversity, and their species composition and specialism were higher than other families. Deciduous broad-leaved tree species domi-

张式雷

1970年生/男/山东青岛人/硕士/工程技术
研究员(正高级)/研究方向为生态修复

张良振

1995年生/男/辽宁省阜新市人/硕士/研
究方向为生态修复

李春林

1967年生/男/山东青岛人/正高级工程师/
研究方向为生态修复

基金项目:

住房和城乡建设部项目“城市公园绿地体检与生态价值评估技术”(编号: 2022-K-027); 青岛市企业技术创新重点项目“城市公园绿地生态价值评估技术研究”(编号: LX202305.0132)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: cgglb@greensum.com.cn

nated the woody plant groups in Qingdao urban park. Overall, the SCDB values of deciduous plants were higher than those of evergreen plants, and those of broad-leaved plants were higher than those of coniferous plants. However, at the individual level, the average SCBD value of deciduous trees was lower than that of evergreen trees, and that of broad-leaved trees was lower than that of coniferous trees. Although the species richness of evergreen or conifer plants was lower, the species uniqueness of evergreen or conifer plants was higher, and they had higher conservation value. The contribution of Zhongshan Park to β diversity was the largest, and the LCBD values were positively correlated with the species richness of the park. This study suggests that parks with high species richness should be protected, and using environmental heterogeneity in different parks to increase the uniqueness of woody plants is of great value in preserving the plant diversity of urban green space.

Keywords

urban park; woody plant communities; species composition; β diversity

公园是城市生态系统中生物多样性最为丰富的区域，已成为城市发展不可或缺的绿地系统组成^[1-2]。在面临城市化加速导致生物多样性骤降的背景下，城市公园可作为生物的庇护所和栖息地，满足不同生物种群的生存需求，降低其受到威胁的风险，同时维护城市生态系统的稳定^[3-4]。城市公园中物种分布格局多为典型的人工植物群落，相较于稳定的自然生态系统，城市公园面对环境污染、生境破碎、生物入侵、人为活动等外界干扰具有较差的抵抗力。而外界干扰力对生物多样性带来的影响往往引起植物群落结构和功能的改变^[5]。 β 多样性对于预测生态系统功能受到生物多样性变化的影响具有至关重要的作用，其能直观反映植物群落中物种的空间异质性和空间分布格局^[6-7]，反映出群落物种构成在不同地段的动态更新规律^[8]，使人们深入了解推动生物多样性变化的机制及其对多种生态系统功能的影响。在受环境波动和干扰程度较大的群落中， β 多样性的作用尤为明显。

β 多样性反映了局域群落之间物种组成的变化程度，是连接局域和区域多样性的纽带^[9-10]。早期研究利用Whittaker指数揭示群落物种组成随不同环境梯度的替换速率^[11-12]，然而，该指数很难揭示单个物种或物种集合

对 β 多样性的贡献程度。因此，Legendre和De Cáceres^[13]提出用群落二元丰富度的方差分解来描绘 β 多样性，并将其分解为物种对 β 多样性的贡献（SCBD）和样地对 β 多样性的贡献（LCBD）。利用SCBD反映单一物种对群落 β 多样性变化的影响，LCBD则反映样方中物种组成的独特性。李捷等^[14]等分析了在不同干扰强度下单个物种和单个干扰位点对高寒草甸 β 多样性的贡献，研究指出重点保护LCBD值较高的生境及SCBD值较高的物种，有利于保护高寒草甸植物群落的多样性。谭凌照^[15]分析了样方和物种对温带森林群落 β 多样性的贡献，探索了影响群落物种组成的样方及物种因素，发现LCBD与物种丰富度、多度和环境条件密切相关，提出生物多样性保护区的建立应重点关注LCBD值较高的生境，而SCBD受到物种多度及物种生态位特征显著影响，这对森林生物多样性的保护具有重要意义。

城市公园作为城市生态系统重要的组成部分，是开展城市公园生态系统结构功能和空间格局研究的重要对象^[16]。近年来，随着城市生态效益提升及绿地景观提升对生物多样性的影响，城市化背景下的公园木本植物群落多样性受到国内学者的高度关注。目前，国内城市公园木本植物群落的研究偏向于宏

观尺度，通过选取具有代表性的典型植被群落，从群落结构、物种多样性、分布格局、景观及生态效益多方面进行研究，进一步总结符合当地区域生态景观发展的植物群落分布结构^[17]。徐勇等^[18]分析了扬州市11个城市公园不同层次植物多样性和稳定性，指出公园植物配置使用非乡土树种较多，以木本植物为主的乔、灌木层的生物多样性最高，植物种类同质化较低，植物群落差异性较大；段敏杰等^[19]对北京副中心三个城市公园的绿地植物群落进行研究，分析了物种组成、应用频度及物种多样性，探究表明植物群落结构逐渐向近自然植物群落复层结构发展，提出应补充灌木植物应用的规划；黄柳菁等^[20]分析了福州市的市区、近郊区和远郊区城市公园木本植物多样性的分布格局，指出在城市化综合因素影响下，城市公园木本植物多样性随城郊梯度变化呈现由市区向远郊区线性递减的分布格局；孙宇宁等^[21]对青岛滨海城市公园木本植物群落特征和空间量化进行研究，指出青岛滨海绿地植物群落主要由乔木、灌木组成，空间分布略显单一化；吴光洪等^[22]对青岛城市公园植物群落结构进行了研究，提出木本植物群落以针阔混交型为主，使用乡土树种的比例较高，但草本植物的应用被忽视；马栋栋等^[23]对青岛11个城市

公园的木本植物群落多样性进行了研究,指出青岛城市公园植物多样性南北分布格局差异较大,滨海区域城市公园木本植物多样性较高。总体而言,国内对于城市公园物种多样性的研究大多采用 α 多样性指标,虽然能够反映区域内不同植物群落生境稳定性和物种丰富度,但无法量化单独物种或物种组合对群落物种组成差异的影响,因此不能提出具有针对性的保护策略。鉴于此,文章通过对青岛城市公园木本植物群落的实地调查和分析,旨在揭示城市公园绿地群木本植物群落的 β 多样性特征,以期确定单独物种、物种组合、单个园区或共同联系对植物群落 β 多样性保护的价值,为进一步完善青岛市城市公园生态系统结构与功能研究提供科学依据,并为其他城市公园绿地生物多样性保护提供参考。

1 研究区概况

青岛是中国沿海重要的中心城市,位于山东半岛东南部,背靠崂山,东濒黄海,35° 35'—37° 09' N, 119° 30'—121° 00' E,具有显著的海洋性特点,属暖温带季风气候,

四季分明,年平均气温11~12℃,最高气温38.6℃,最低气温-7.5℃。年平均降水量为600~1000 mm。

青岛市已建成的城市公园有128个,涵盖了市南、市北、李沧、崂山等区域。本研究选取位于城市中心区域的典型山地公园绿地群(36° 03' 10"—36° 04' 50" N, 120° 17' 20"—120° 23' 00" E),包括太平山公园的7个园区及其周边的4个小型公园。

2 研究方法

2.1 样地设置及调查方法

本研究于2023年3—9月对青岛城市公园的木本植物群落进行实地调查,选取了11个城市中心公园(表1),分别名为榉树公园(Park 1)、动物园(Park 2)、百花苑公园(Park 3)、中山公园(Park 4)、青岛山公园(Park 5)、植物园(Park 6)、汇泉广场公园(Park 7)、观海山公园(Park 8)、观象山公园(Park 9)、信号山公园(Park 10)、小鱼山公园(Park 11)。选择人为干扰程度较小的区域设置样地,样地面积大小为10 m×10 m,每个园区各设置10个样地,共包含110个样地。各城市公园及

各样地的分布如图1所示。将10 m×10 m的样地划分为4个5 m×5 m的小样方进行木本植被调查,记录小样方内出现的所有木本植物种类。

2.2 数据处理

研究木本植物对群落 β 多样性的影响,采用植物群落二元丰富度的方差分解法度量物种对研究区域 β 多样性的贡献和子局域对区域 β 多样性的贡献^[13,24]。本研究中将木本植物对群落 β 多样性的贡献进一步划分为单个物种、不同科类、不同植物类型和不同园区对群落 β 多样性的影响。首先计算木本植物群落的二元丰富度组成矩阵总方差作为区域的 β 多样性值(BD_{total});再运用公式计算SCBD和LCBD。在Legendre分解法中,通过城市公园木本植物群落的二元丰富度组成的矩阵(Y),由 n 个公园(行)和 p 个物种(列)所构成。矩阵(Y)中每个值用 y_{ij} 表示, \bar{y}_j 为第 j 个物种的二元丰富度平均值,在每个城市公园中,某个物种出现记为“1”,未出现记为“0”。

研究区域 β 多样性计算见公式(1),SCBD的计算见公式(2),LCBD的计算见公式(3)。

表1 青岛城市公园基本概况
Tab. 1 Basic overview of Qingdao urban parks

公园名称 Name of park	简称 Abbreviation	面积/hm ² Area	建成时期 Period	功能定位 Function	分布区域 Region	植物群落类型 Type
榉树公园	Park 1	18.40	1986年	综合性山体公园	市区山地	人工植物群落
动物园	Park 2	31.43	1977年	综合性公园	市区	人工植物群落
百花苑公园	Park 3	8.25	1990年	综合性公园	市区	人工植物群落
中山公园	Park 4	67.40	1902年	综合性山体公园	市区山地	近自然植物群落
青岛山公园	Park 5	22.25	19世纪末	综合性山体公园	市区山地	近自然植物群落
植物园	Park 6	81.38	1976年	综合性山体公园	市区山地	人工植物群落
汇泉广场公园	Park 7	13.43	20世纪初	综合性广场公园	临海市区	人工植物群落
观海山公园	Park 8	0.53	1985年	综合性山头公园	市区山地	人工植物群落
观象山公园	Park 9	6.32	1910年	综合性山体公园	市区山地	近自然植物群落
信号山公园	Park 10	6.39	1987年	综合性山体公园	市区山地	近自然植物群落
小鱼山公园	Park 11	2.54	1985年	综合性山头公园	临海山地	近自然植物群落

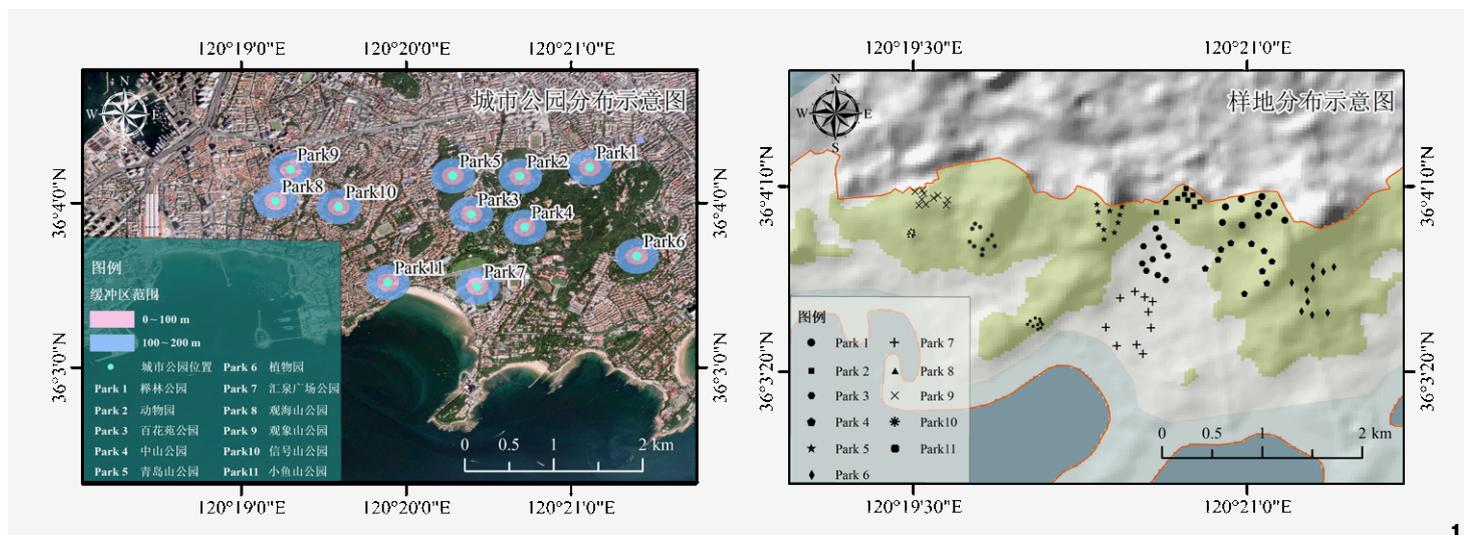


图1 研究区域城市公园及样地分布
Fig. 1 Distribution of urban parks and sample plots in the study area

式中, SS_j 和 SS_i 分别为物种 j 的方差和第 i 个样地的方差。数据分析和作图采用Excel和OriginPro2021软件, 地图制作使用ArcGIS 10.2软件。

$$BD_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (y_{ij} - \bar{y})^2}{n-1} \quad (1)$$

$$SCBD = \frac{SS_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (y_{ij} - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$LCBD = \frac{SS_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (y_{ij} - \bar{y})^2} \quad (3)$$

3 结果和分析

3.1 物种组成和分布

通过对研究区内110个样方调查结果进行统计, 11个城市公园所属研究区域内共有木本植物113种, 隶属42科74属(表2), 物种丰富度较高。其中, 物种数排名较多依次为蔷薇科(Rosaceae)、松科(Pinaceae)、柏科(Cupressaceae)、无患子科(Sapindaceae)和豆科

(Leguminosae), 物种构成占优, 共计26属44种, 分别占属、种总数的61.90%、38.94%。弱势少数种多分布于五加科(Araliaceae)、苦木科(Simaroubaceae)、茜草科(Rubiaceae)、金缕梅科(Hamamelidaceae)等19个科, 占科类总数的45.23%, 共计19属19种, 占属、种总数的25.68%、16.81%, 表明物种组成特征为优势多数种所属科类较少, 而弱势少数种所属科类较多。

如表3所示, 研究区中常绿植物与落叶植物的科类、属类及物种组成比例均接近1:2, 说明落叶树种在园区内木本植物群落分布占优。与此同时, 受地理位置和气候特征的影响, 常绿树种在青岛城市公园的分布也相对广泛。木本植物中阔叶树种与针叶树种的物种组成比例为5.7:1, 阔叶植物的物种丰富度远高于针叶植物。可见, 研究区域内植被类群以落叶阔叶树种为主。

不同类群树种在各个园区的分布情况如表4所示, 物种丰富度最高的公园为Park 4, 物种数高达52种, 其常绿阔叶树种和落叶

阔叶树种的种类均要多于其他园区。Park 1、Park 6和Park 10的物种丰富度较为接近, Park 5的物种丰富度最低。落叶阔叶树种在各园区内的分布最为广泛, 其次为常绿阔叶树种和常绿针叶树种, 落叶针叶树种的比例则相对较小。

每个物种在城市公园中的出现频数如图2所示, 出现频数超过4个的物种共计15种, 其中, 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和黑松(*Pinus thunbergii*)分布广泛, 在10个城市公园种均有分布。而出现频数为1的物种多达58种, 占物种总数的51.3%, 如豪猪刺(*Berberis julianae*)、阔叶十大功劳(*Mahonia bealei*)仅在Park 2中分布, 体现了各个公园的物种组成的差异化及环境异质性。

3.2 城市公园木本植物对群落 β 多样性的贡献

研究结果表明, 研究区域总 β 多样性值为16.9091, 单物种的SCBD的平均值为0.00885。如图3所示, 113种木本植物中有73种超过平均值, 其中, 山茶(*Camellia japonica*)、黄连

表2 青岛城市公园木本植物科、属、种构成
Tab. 2 Composition of woody plant families, genera and species in Qingdao urban parks

序号 No.	科 Family	属 Genus		种 Species	
		物种数/个	百分比/%	物种数/个	百分比/%
1	蔷薇科 (Rosaceae)	7	9.46	12	10.62
2	松科 (Pinaceae)	3	4.05	9	7.96
3	柏科 (Cupressaceae)	6	8.11	8	7.08
4	无患子科 (Sapindaceae)	3	4.05	8	7.08
5	豆科 (Leguminosae)	7	9.46	7	6.19
6	木樨科 (Oleaceae)	3	4.05	6	5.32
7	杨柳科 (Salicaceae)	2	2.71	4	3.54
8	榆科 (Ulmaceae)	2	2.71	4	3.54
9	大麻科 (Cannabaceae)	1	1.35	3	2.67
10	冬青科 (Aquifoliaceae)	1	1.35	3	2.67
11	虎耳草科 (Saxifragaceae)	2	2.71	3	2.67
12	壳斗科 (Fagaceae)	1	1.35	3	2.67
13	木兰科 (Magnoliaceae)	2	2.71	3	2.67
14	五福花科 (Adoxaceae)	1	1.35	3	2.67
15	杜鹃花科 (Ericales)	1	1.35	2	1.77
16	海桐花科 (Pittosporaceae)	1	1.35	2	1.77
17	黄杨科 (Buxaceae)	1	1.35	2	1.77
18	锦葵科 (Malvaceae)	2	2.71	2	1.77
19	漆树科 (Anacardiaceae)	2	2.71	2	1.77
20	桑科 (Moraceae)	2	2.71	2	1.77
21	山茱萸科 (Cornaceae)	1	1.35	2	1.77
22	卫矛科 (Celastraceae)	2	2.70	2	1.77
23	小檗科 (Berberidaceae)	2	2.70	2	1.77
24	五加科 (Araliaceae)	1	1.35	1	0.88
25	苦木科 (Simaroubaceae)	1	1.35	1	0.88
26	茜草科 (Rubiaceae)	1	1.35	1	0.88
27	金缕梅 (Hamamelidaceae)	1	1.35	1	0.88
28	丝缨花科 (Garryaceae)	1	1.35	1	0.88
29	楝科 (Meliaceae)	1	1.35	1	0.88
30	腊梅科 (Calycanthaceae)	1	1.35	1	0.88
31	大风子科 (Flacourtiaceae)	1	1.35	1	0.88
32	绣球科 (Hydrangeaceae)	1	1.35	1	0.88
33	玄参科 (Scrophulariaceae)	1	1.35	1	0.88
34	樟科 (Lauraceae)	1	1.35	1	0.88
35	山茶科 (Theaceae)	1	1.35	1	0.88
36	蓝果树科 (Nyssaceae)	1	1.35	1	0.88
37	悬铃木科 (Platanaceae)	1	1.35	1	0.88
38	安息香科 (Styracaceae)	1	1.35	1	0.88
39	银杏科 (Ginkgoaceae)	1	1.35	1	0.88
40	大戟科 (Euphorbiaceae)	1	1.35	1	0.88
41	禾本科 (Gramineae)	1	1.35	1	0.88
42	千屈菜科 (Lythraceae)	1	1.35	1	0.88

木 (*Pistacia chinensis*)、朴树、榉树等9个物种对群落β多样性的贡献最高，其SCBD值均达到0.01613。SCBD最小值为0.00538，主要源于广泛分布的苦楝 (*Melia azedarach*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、国槐 (*Styphnolobium japonicum*)、黑松等60个物种，占物种总数的53.1%。

如图4所示，单一物种对群落β多样性的贡献与其在不同园区的出现频数显著相关 ($p < 0.01$)，呈开口向下的抛物线关系，说明物种在不同园区出现频度过高或过低，均会导致对群落β多样性的贡献度较低，如分布广泛的刺槐和黑松，在10个公园中均有分布，但SCBD值仅为0.0054。而出现频度居中的物种其SCBD值较高，如朴树 (0.0161)、榉树 (0.0161) 等树种。

从木本植物科水平来看，不同科类对群落β多样性的影响如图5所示，不同科类的SCBD平均值为0.0233，共有14个科类在平均值之上，其中蔷薇科、柏科、松科、豆科的SCBD分别达到0.129、0.1011、0.071、0.0591。SCBD最小值为0.0054，主要由大戟科 (*Euphorbiaceae*)、安息香科 (*Styracaceae*)、樟科等 (*Lauraceae*) 等10个科类所贡献。

如图6所示，各科类的SCBD与各科下的物种数水平呈正相关关系 ($p < 0.01$)，物种丰富度最高的蔷薇科对群落β多样性的贡献度是单一物种所属科类的23.89倍，主要为大戟科、安息香科、茜草科等科类物种组成较少，且物种分布范围较小。

不同植物类型对群落β多样性的影响如图7所示，由于落叶植物在各个园区内分布更广泛且物种组成数量占优，其总体SCBD值 (0.6194) 显著高于常绿植物 (0.3806)，但落叶植物的SCBD平均值 (0.0086) 却低于常绿植物 (0.0093)，表明落叶木本植物个体平均

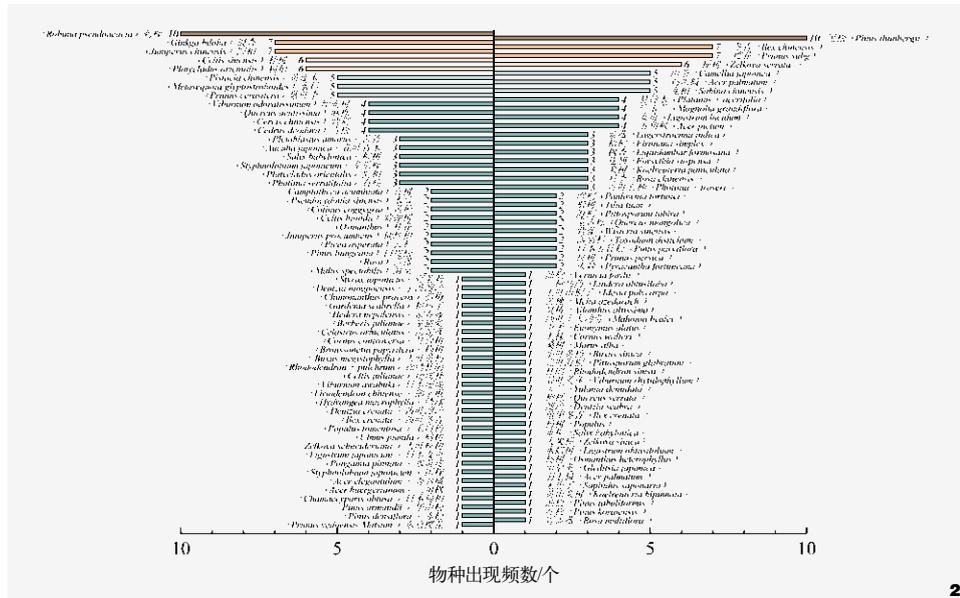


图2 单一物种在不同园区的出现频数
Fig. 2 Frequency of occurrence of single species in different urban parks

表3 青岛城市公园不同类型木本植物的物种组成
Tab. 3 Species composition of different types of woody plants in Qingdao urban parks

植物类别 Type	科 Family		属 Genus		种 Species	
	科类/个	百分比/%	属类/个	百分比/%	物种数/个	百分比/%
常绿植物	16	38.10	25	33.78	41	36.28
落叶植物	31	73.81	51	68.92	72	63.72
阔叶植物	40	95.24	64	86.49	96	84.96
针叶植物	2	4.76	9	12.16	17	15.04

表4 木本植物不同类群树种在园区的分布
Tab. 4 Distribution of different groups of woody plants in different parks

公园名称 Name of park	简称 Abbreviation	物种数/个 Number of species	常绿阔叶树种/个 Number of evergreen broad-leaved tree	落叶阔叶树种/个 Number of deciduous broad-leaved tree	常绿针叶树种/个 Number of evergreen conifer species	落叶针叶树种/个 Number of deciduous conifer species
榉树公园	Park 1	26	8	14	3	1
动物园	Park 2	23	7	11	4	1
百花苑公园	Park 3	21	4	10	6	1
中山公园	Park 4	52	13	28	9	2
青岛山公园	Park 5	12	0	10	2	0
植物园	Park 6	28	5	17	5	1
汇泉广场公园	Park 7	16	4	9	2	1
观海山公园	Park 8	16	3	7	5	1
观象山公园	Park 9	20	3	13	4	0
信号山公园	Park 10	27	6	16	5	0
小鱼山公园	Park 11	22	4	16	2	0

水平对群落β多样性的贡献较常绿木本植物个体相对较低。阔叶植物总体对群落β多样性的贡献更显著，但阔叶植物的SCBD平均值(0.0086)却低于针叶植物(0.01)，虽然阔叶植物整体的物种多样性更高，但个体平均水平对群落β多样性的贡献可能较低，导致其SCBD平均值低于针叶树种。

不同园区对群落β多样性的贡献差异如图8所示，全部公园LCBD的平均值为0.0914，超过平均值的公园共有5个，依次为Park 4、Park 6、Park 10、Park 2、Park 1。其中，LCBD最大值为0.1677，由Park 4所贡献，LCBD最小值为0.0623，源于Park 5。通过图9可以看出，LCBD与物种丰富度显著相关($p < 0.001$)，不同园区LCBD随着群落中物种丰富度的增加而增加，表明物种丰富度是影响β多样性的关键因素。

4 讨论

通过对青岛城市公园群的11个园区进行物种调查发现，蔷薇科、松科、柏科、无患子科和豆科的植物种类较多，占群落物种组成的主体，且大多为青岛乡土树种，对

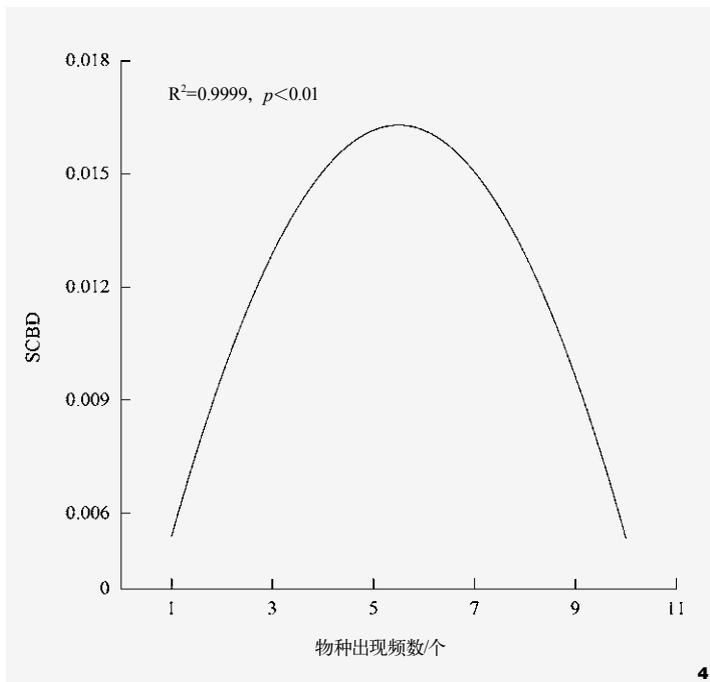
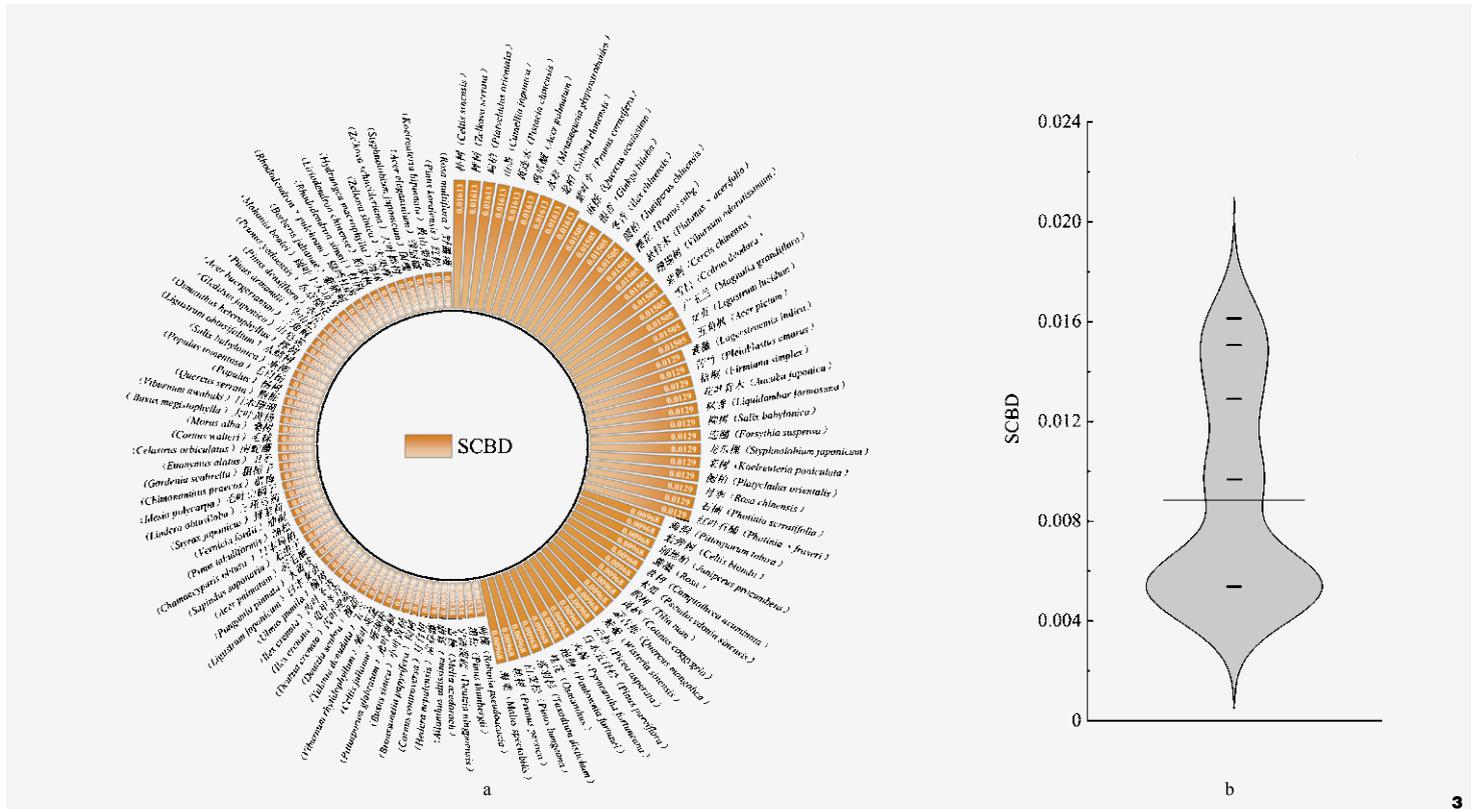


图3 单一物种对群落β多样性的贡献 (SCBD) 及其分布
Fig. 3 Contribution of single species to β diversity (SCBD) and its distribution

图4 单一物种对群落β多样性的贡献 (SCBD) 与物种出现频数的关系
Fig. 4 Relationship between the value of single species contribution to β diversity (SCBD) and frequency of occurrence of single species

环境的适应能力较强，分布较为较广。如刺槐和黑松在10个园区中均有分布，在海拔较高、光照充足、土壤条件较差的山头等较贫瘠区域易形成优势种群^[25-26]。其次，如豪猪刺、阔叶十大功劳等弱势种植物，由于受生境过滤与扩散限制的共同影响^[27]，分布受限，生态位宽度也相对较窄，在资源竞争中处于劣势，难以转移扩散到其他城市公园中占据一定的生态位^[28-29]。因此，一些物种可能在某些公园中较为常见，而在其他公园中较为罕见。从不同树种类别来看，青岛城市公园中落叶树种或阔叶树种的比例较高。这符合前人总结的温带地区城市公园群落物种组成特点^[30-31]。相较于温带地区公园绿地木本植物群落中常绿树种与落叶树种1:3的分布比例^[32-33]。本研究发现青岛城市公园木本植物群落中常绿植物与落叶植物比例为1:1.76。常绿木本植物所占比例明显高于郑州市城市公园绿地^[34]、北京城市中心公园绿地^[19]等一般温带地区城市公园。

本研究发现，在青岛城市公园中，山茶、黄连木、朴树、榉树等物种的SCBD值最大，对整个区域的β多样性有重要贡献，可以看出这些木本植物分布均匀，对不同生境具有较高的适应性。这是因为按

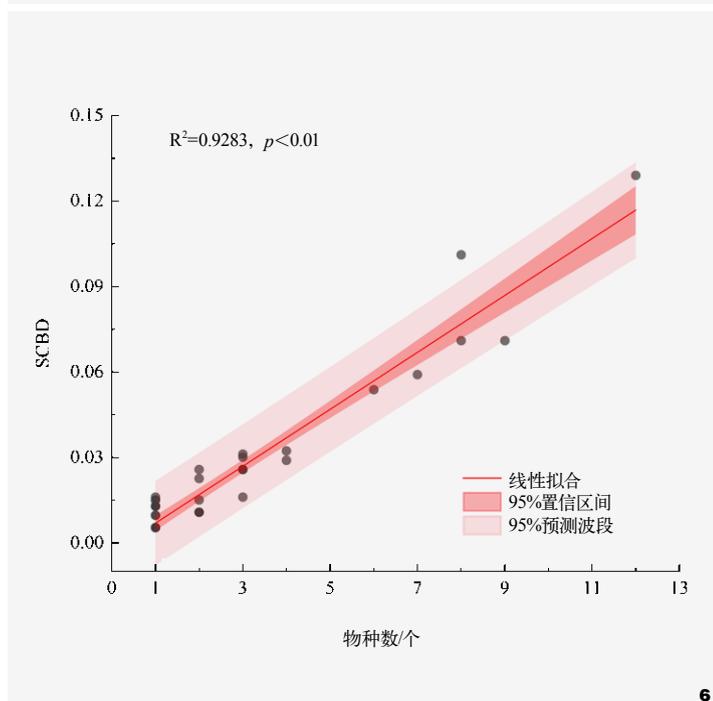
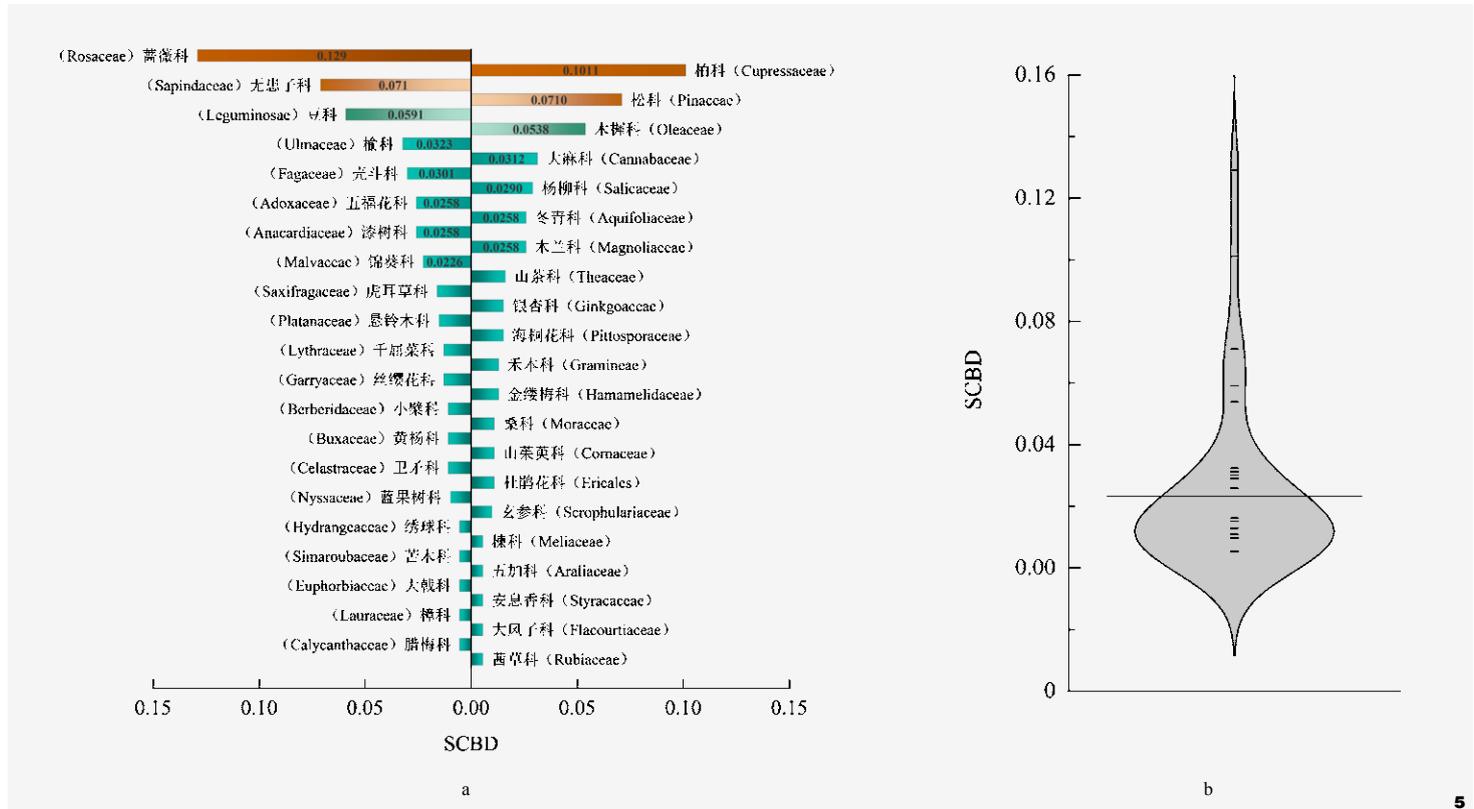


图5 不同科类对群落β多样性的贡献 (SCBD) 及其分布
Fig. 5 Contribution of different families to β diversity (SCBD) and its distribution

图6 不同科类对群落β多样性的贡献 (SCBD) 与物种数的关系
Fig. 6 Contribution of different families to β diversity (SCBD) in relation to number of species

照公园的植物配置方案在特定区域内进行初始种植时，在生境中分布范围较为集中，受人为中度干扰及环境因子共同影响下，其分布方式由集中分布转化为随机分布，生态位宽度变大，可以扩散到不同生境中，从而在整个区域内发挥重要的生态功能^[35-36]。相对均匀分布的树种，广泛分布且数量占优的常见种如苦楝、构树、国槐、黑松等物种其SCBD值最小，多为不同园区共有物种，对群落β多样性的贡献度最低。这与谭凌照^[15]分析物种贡献对局域群落β多样性的影响的研究结果相异，其认为生态位宽度与SCBD存在正相关关系，分布越广泛的物种对β多样性越具有重要贡献。可能由于这些物种在植物群落中普遍存在，生态位宽度较大，对空间资源的竞争力较强，虽然在人为干扰及环境因素影响下，能够在不同园区进行物种迁移并生存下来，但会造成群落物种相似度过高，导致城市公园之间环境差异性变小，不能为其他机会主义物种创造条件，从而对整个区域的β多样性贡献不足。本研究还发现，单一物种对群落β多样性的贡献与该物种在不同园区出现频数相关，当一种植物在不同城市公园出现的机会过高或过低时，其对β多样性贡献的重要性均较低，而出现频数较为居中的

物种则对β多样性有较高的贡献。这与李捷等^[14]通过高寒草甸β多样性对高原鼠兔干扰的响应研究结果相似。可能由于生境多样性迫使不同物种的适应性发生明显分化，导致其在不同城市公园中出现机会差异较高，从而对整个区域植被群落β多样性有重要贡献。

从木本植物的科水平来看，不同科类SCBD与科类下不同物种的数量显著相关($p < 0.01$)，物种丰富度排名较高的科类如蔷薇科、松科、柏科等对植物群落β多样性的贡献更高，意味着物种丰富度的增加能够提高不同科类对群落β多样性贡献度。这与谭凌照^[15]分析物种贡献对东北温带森林群落β多样性影响的研究结果相似。可能是因为物种组成占优的科类中，不同物种往往能够在生境资源利用上有所差异，表现为在生境资源利用方式上相互分化，这种生态位分化会增加物种间的差异性，进而提高了群落的β多样性。

结果表明，在青岛城市不同公园中，落叶植物的SCBD值高于常绿植物，但其物种SCBD平均值却低于常绿树种；阔叶植物的SCBD显著高于针叶植物，但其SCBD均值低于针叶树种。这可能是由于落叶植物或阔叶植物中具有相似生态位的多个物种共存，它们的生态位发生重叠，导致物种间竞争更加剧烈，从而限制了这些共存物种之间的差异性，进而降低了其平均贡献水平^[37]。

从园区对群落β多样性的贡献水平可以看出木本植物群落中物种的周转变化和分布，以及不同园区的生境异质性，从而判断人为干扰、环境异质性和随机性等因素对生物多样性和生态系统功能的影响程度^[7,38]。本研究发现，不同园区对群落β多样性的贡献存在明显差异，丰富度越高的园区对β多样性的贡献越大。这与Qiao等^[39]在八大公山森

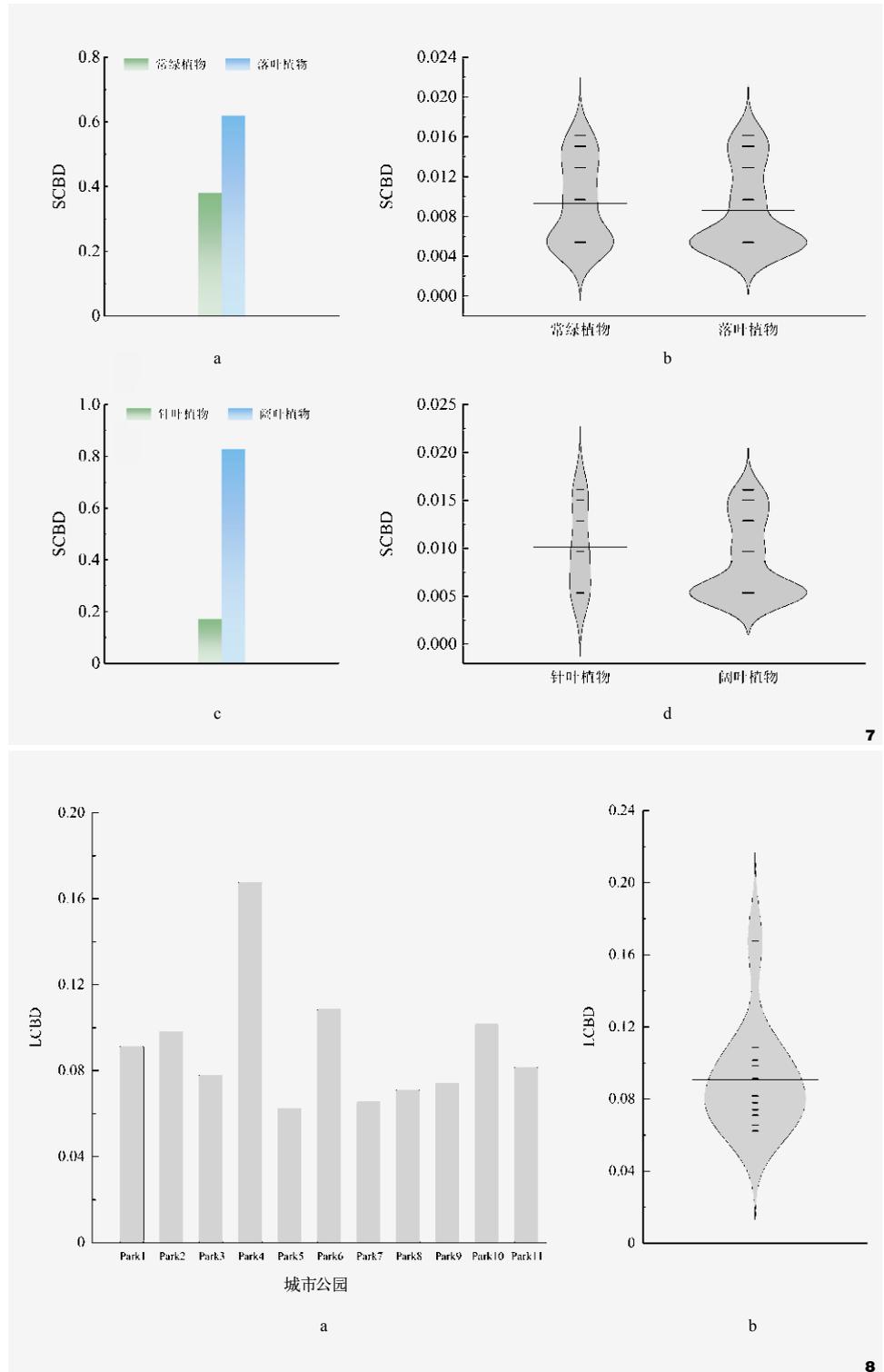


图7 不同植物类型对群落β多样性的贡献 (SCBD) 及其分布
Fig. 7 Contribution of different plant type to β diversity (SCBD) and its distribution

图8 不同园区对群落β多样性的贡献 (LCBD) 及其分布
Fig. 8 Contribution of different parks to β diversity (LCBD) and its distribution

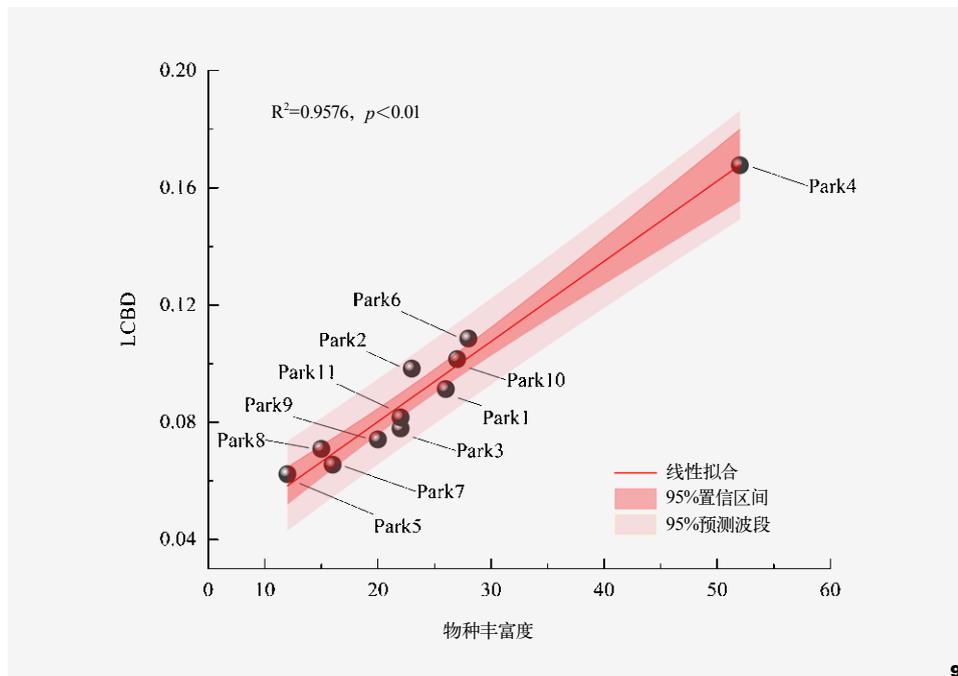


图9 不同园区对群落 β 多样性的贡献 (LCBD) 与物种丰富度的关系
Fig. 9 Contribution of different parks to β diversity (LCBD) in relation to species richness

林群落 β 多样性对稀有物种丰富度响应的研究结果一致，但与谭凌照^[15]、李捷等^[14]在干扰位点对群落 β 多样性的贡献方面研究结果相异。这可能是因为，较高的物种丰富度增加了群落中物种间的差异性和物种独特性，并不代表群落间物种共享的机会变大，丰富度本身就是 β 多样性形成的重要基础，可以为 β 多样性的形成提供更大的潜力^[40]。同时，物种丰富度也体现了环境的异质性，由于不同城市公园的生境条件经人为干扰后发生较大变化，较高的环境异质性能为不同物种提供更适宜的环境条件，这些物种之间的差异性就会促成 β 多样性的形成^[41]。

β 多样性能够具体衡量单一物种、科类水平、树种水平等物种组合以及不同园区对区域内群落物种组成差异的影响，有利于从物种构成和环境差异性的角度提出关于城市公园木本植物群落生物多样性保护的针对性

策略。在青岛各个城市公园中，木本植物群落中物种组成以松科、柏科、豆科植物为主，具有较强的环境适应能力，多集中于水土条件较差山地区域。其中，优势树种如刺槐、黑松，弱势树种如豪猪刺、阔叶十大功劳等物种的SCBD值较低，对群落 β 多样性的贡献均较低，而在在公园中出现频数居中的物种如黄连木、朴树、榉树等对群落 β 多样性的贡献较高。不同科类对群落 β 多样性的重要性与科类下物种丰富度水平呈正相关关系，物种丰富度较高的科类如蔷薇科、松科的SCBD值更大，应降低人为干扰程度，提高园区中不同科类的物种组成的数量。青岛城市公园中的木本植物类群以落叶阔叶树种为主，从整体上看，落叶植物对群落 β 多样性的贡献高于常绿植物，阔叶植物对群落 β 多样性的贡献高于针叶植物，但从个体水平上看，落叶树种的SCBD平均值低于常绿树种，阔叶

树种的SCBD平均值低于针叶树种，虽然常绿植物或针叶植物的物种丰富度较低，但物种独特性较高，具有较高的保护价值。城市公园中的Park 4、Park 6和Park 10的LCBD值较大，这三个公园的物种丰富度较高且物种组成具有较高的独特性，因此对群落 β 多样性的贡献更高，具有较高的保护价值。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 王任翔, 王金虎. 昆山市公园植物群落结构和物种组成及优化策略[J]. 中国城市林业, 2020, 18(04): 44-49.
- [2] 李明娟, 赵娟娟, 刘时彦, 等. 山地城市公园植物群落功能多样性与物种多样性研究——以重庆市主城区为例[J]. 中国园林, 2021, 37(02): 124-129.
- [3] 孙德儒. 呼和浩特城市公园木本植物多样性评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [4] GODDARD A M, DOUGILL J A, Benton G T. Scaling Up from Gardens: Biodiversity Conservation in Urban Environments[J]. Trends in Ecology Evolution, 2009, 25(2): 90-98.
- [5] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土, 2014, 36(05): 1298-1305.
- [6] 李大标, 钟毓萍, 龚笑飞, 等. 浙江遂昌马尾松林物种和谱系 β 多样性驱动因子分析[J]. 广西植物, 2023, 43(07): 1258-1267.
- [7] 曲梦君, 努尔依拉·阿巴拜克, 邹旭阁, 等. 地理距离和环境因子对阿拉善戈壁植物群落 β 多样性的影响[J]. 生物多样性, 2022, 30(11): 109-118.
- [8] 卢品, 金毅, 陈建华, 等. 地理距离和地形差异对两个大型森林动态样地 β 多样性的影响[J]. 生物多样性, 2013, 21(05): 554-563.
- [9] WHITTAKER R H. Evolution and Measurement of Species Diversity[J]. Taxon, 1972, 21(2-3): 213-251.
- [10] CONDIT R, PITMAN N, LEIGH G E, et al. Beta-Diversity in Tropical Forest Trees[J]. Science, 2002, 295(5555): 666-669.
- [11] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨. 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替[J]. 生态学报, 2013, 33(07): 2236-2247.

- [12] 缪三华, 郑德祥, 蔡杨新, 等. 闽北闽粤栲天然林高度级结构分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(06): 45-50.
- [13] LEGENDRE P, DE CÀCERES M. Beta Diversity as the Variance of Community Data: Dissimilarity Coefficients and Partitioning[J]. Ecology Letters, 2013, 16(8): 951-963.
- [14] 李捷, 陈莹莹, 乔福云, 等. 高原鼠兔干扰对高寒草甸β多样性的影响[J]. 植物生态学报, 2021, 45(05): 476-486.
- [15] 谭凌照. 东北温带森林群落不同空间尺度下β多样性及群落构建机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [16] 胡兵. 重庆城市公园绿地群落结构与木本植物多样性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [17] 吴若男. 南宁市新秀公园绿地植物群落研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [18] 徐勇, 丁海权, 罗云建, 等. 扬州市城市公园植物多样性研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, 43(06): 140-146.
- [19] 段敏杰, 丛日晨, 王月容, 等. 北京城市副中心公园绿地植物多样性特征[J]. 北京农学院学报, 2021, 36(04): 110-115.
- [20] 黄柳菁, 王齐, 林丽丽, 等. 城市化背景下公园木本植物多样性的分布格局[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(06): 1052-1059.
- [21] 孙宁宇, 唐世斌. 城市公园植物群落特征及空间量化评价研究——以青岛滨海为例[J]. 林业调查规划, 2023, 48(05): 207-211.
- [22] 吴光洪, 敬婧, 吴双跃, 等. 南暖温带城市公园植物群落结构研究——以青岛、徐州为例[J]. 浙江林业科技, 2016, 36(03): 36-42.
- [23] 马栋栋, 吴海霞, 王晓茜, 等. 青岛城市公园绿地多样性研究[J]. 山东林业科技, 2012, 42(02): 52-54.
- [24] LEGENDRE P. Studying Beta Diversity: Ecological Variation Partitioning by Multiple Regression and Canonical Analysis[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(1): 3-8.
- [25] 郭建曜, 王深, 杨静, 等. 鲁中南山地黑松人工林土壤和林下植被的动态格局[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(02): 209-218.
- [26] 李佳梅, 朱启良, 马璟, 等. 华北石质山地麻栎和刺槐混交林浅层细根特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(01): 37-42.
- [27] 饶米德, 冯刚, 张金龙, 等. 生境过滤和扩散限制作用对古田山森林物种和系统发育β多样性的影响[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1204-1212.
- [28] 强亚琪, 范春雨, 张春雨. 长白山暗针叶林群落物种多样性维持机制[J]. 生态学报, 2023, 43(05): 1884-1891.
- [29] 黄睿雪, 欧静, 王洪飞, 等. 百里杜鹃国家森林公园植物群落物种多样性及优势种生态位宽度对人为干扰的响应[J/OL]. 生态学杂志: 1-17[2024-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q20231103.1414.008.html>
- [30] 范伟伟, 张光平. 太原市汾河公园和森林公园植物物种多样性比较[J]. 山西农业科学, 2015, 43(10): 1301-1304.
- [31] 李茗蕊. 城市森林的结构特征及其生态环境服务功能研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2019.
- [32] 苑征, 李湛东, 徐海生, 等. 公园绿地常绿与落叶树种比例的比较分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(S1): 194-199.
- [33] 郭绍霞, 赵秀芬. 青岛市中山公园木本植物多样性研究[J]. 北方园艺, 2012(11): 93-96.
- [34] 张娜娜. 郑州市公园绿地植物多样性与景观研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.
- [35] 庞晓攀, 贾婷婷, 李倩倩, 等. 高原鼠兔有效洞穴密度对高山嵩草群落及其主要种群空间分布特征的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(03): 873-884.
- [36] 齐昊昊. 高原鼠兔刈割对高寒草甸植物种群生态位及种间关联的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [37] 俞昀, 白小军, 王志一. 大兴安岭次生林区不同龄级落叶松(*Larix gmelinii*)生态位特征和竞争关系[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4912-4921.
- [38] 李星, 辛智鸣, 董雪, 等. 敦煌北山及马鬃山地区植物群落β多样性及其解释[J]. 干旱区研究, 2022, 39(05): 1464-1472.
- [39] QIAO X J, LI Q X, JIANG Q H, et al. Beta Diversity Determinants in Badagongshan, a Subtropical Forest in Central China[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 17043.
- [40] 何存存, 张春雨, 赵秀海. 吉林蛟河针阔混交林群落β多样性的影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(02): 325-330.
- [41] 王世雄, 夏婷婷, 王孝安. 黄土高原油松和辽东栎林下植物β多样性差异及影响因素[J]. 广西植物, 2021, 41(03): 362-371.