

DOI: 10.5846/stxb20220200405

孙玉真, 王志泰, 包玉, 魏文飞, 杨兴艺. 城市遗存山体植被群落特征对不同人为干扰方式及强度的响应. 生态学报, 2023, 43(11): 4632-4650.

Sun Y Z, Wang Z T, Bao Y, Wei W F, Yang X Y. Response of plant community characteristics of urban remnant mountains to different ways and intensity of artificial disturbance. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4632-4650.

城市遗存山体植被群落特征对不同人为干扰方式及强度的响应

孙玉真¹, 王志泰^{1,2}, 包 玉^{1,2,*}, 魏文飞¹, 杨兴艺¹

¹ 贵州大学林学院, 贵阳 550025

² 贵州大学风景园林规划设计研究中心, 贵阳 550025

摘要: 快速城市化发展对城市内植被和生物多样性产生了显著的影响, 研究植物群落特征对人为干扰的响应规律可为城市残余生境生态恢复、生物多样性保护及植被的合理开发利用提供科学依据。以典型的喀斯特多山城市贵阳市为研究区域, 城市遗存山体为研究对象, 基于遥感解译与群落生态学调查和分析等方法, 探讨了不同人为干扰方式及强度对城市遗存山体植被特征、群落物种组成和多样性的影响。结果表明: (1) 中度人为干扰强度下城市遗存山体植被覆盖度(FVC)和植被净初级生产力(NPP)数值最高; 复垦干扰下 FVC 和 NPP 值相一致且为最高, 中小型公园化利用山体 FVC 和 NPP 值完全不一致且 NPP 最低。(2) 不同人为干扰强度和方式下城市遗存山体间的平均物种数和生活型构成均存在显著性差异。整体上城市遗存山体的平均物种数在不同干扰强度下表现为轻度人为干扰>中度人为干扰>重度人为干扰; 不同干扰方式下的平均物种数呈现为人为踩踏>构筑物>工程建设>公园化利用>复垦>工程开挖的趋势; 重度干扰下城市遗存山体的落叶乔木、灌木占比最高, 中度干扰下常绿灌木和多年生草本为主。(3) 不同干扰强度下城市遗存山体植物群落垂直结构各层次物种多样性指数均偏低且存在显著性差异, 乔木层、灌木层 Shannon-Wiener (H')、Simpson (D)、Margelf (R) 指数在中度干扰强度最大, 而在草本层均最小; 均匀度 Pielou (J_h) 指数在乔木层和草本层中表现为轻度人为干扰>中度人为干扰>重度人为干扰, 而在灌木层完全相反。(4) 乔木层 4 种多样性指数在不同干扰方式下的差异较大; 灌木层和草本层的多样性指数在人为踩踏和构筑物建设干扰方式下显著高于其它干扰方式, 工程开挖为主的干扰方式下灌木层和草本层多样性各指数均偏低且存在显著性差异。总体而言, 轻中度人为干扰对城市遗存山体植物群落物种组成和多样性的影响不突出, 且中度干扰对植物群落物种多样性具有一定的促进作用, 但重度干扰对城市遗存山体植物群落特征存在明显的负面影响。

关键词: 遗存山体; 植被群落特征; 物种多样性; 人为干扰

Response of plant community characteristics of urban remnant mountains to different ways and intensity of artificial disturbance

SUN Yuzhen¹, WANG Zhitai^{1,2}, BAO Yu^{1,2,*}, WEI Wenfei¹, YANG Xingyi¹

¹ College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

² Landscape Architecture Planning and Design Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: The rapid urbanization has significant impacts on vegetation and biodiversity within urban area. Studying the response of plant community characteristics to artificial disturbance could provide scientific basis for ecological restoration, biodiversity protection and rational development and utilization of vegetation in urban remnant habitat. Based on remote sensing interpretation and community ecological investigation and analysis, the effects of different artificial disturbance ways

基金项目: 贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z011); 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般 458); 国家自然科学基金项目(32060367)

收稿日期: 2022-02-20; 网络出版日期: 2022-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ybao@gzu.edu.cn

and intensity on the vegetation characteristics, community species composition and diversity of urban remnant mountains (URMs) in Guiyang, a typical karst multi-mountainous city, were analyzed. The results showed that: (1) the URMs fractional vegetation coverage (FVC) and net primary productivity (NPP) were the highest under the moderate disturbance intensity. The FVC and NPP values of the URMs under the disturbance way of reclamation were consistent. The FVC and NPP values of small and medium-sized URMs under the disturbance way of park utilization were completely inconsistent, and their NPP values were the lowest due to the serious disturbance of construction and hard activity sites. (2) There were significant differences in the average number of species and composition among URMs under different disturbance intensity and ways. On the whole, the order of the average number of species of URMs from large to small under different disturbance intensities was light disturbance, moderate disturbance and severe disturbance; the order of the average number of URMs species under different disturbance ways from large to small was human trampling, structures, engineering construction, park utilization, reclamation and engineering excavation; Deciduous trees and shrubs accounted for the highest proportion in URMs under severe disturbance, while evergreen shrubs and perennial herbs dominated URMs under moderate disturbance. (3) Under different disturbance intensities, the species diversity indices of different plant layers were low and there were significant differences. The Shannon-Wiener (H'), Simpson (D) and Margalef (R) indices of tree layer and shrub layer were the largest under moderate disturbance intensity, while those of herb layer were the smallest; Pielou evenness (Jh) indices of tree layer and herb layer were in the order of light disturbance, moderate disturbance and severe disturbance from high to low, while the Jh indices was completely opposite in shrub layer. (4) The diversity indices of tree layer varied greatly under different disturbance ways. The diversity indices of shrub layer and herb layer were significantly higher under the disturbance ways of human trampling and construction than that under the other disturbance ways, and were lower under the disturbance ways dominated by engineering excavation, and there were significant differences. In general, the light and moderate artificial disturbances did not significantly affect the plant species composition and diversity of URMs, and the moderate artificial disturbance promoted the plant species diversity to a certain extent, while the severe artificial disturbance had significantly negative effect on the plant community characteristics of URMs.

Key Words: urban remnant mountains; plant community characteristics; species diversity; artificial disturbance

随着城市的快速扩张和内部致密化发展,大量不透水表面替代了原有的自然植被、水体等,对城市地区生物多样性及生态环境造成重大负面影响^[1-2]。相比自然环境的干扰因素,城市则是完全由人类主导的环境^[3-4],持续不断的人为干扰是城市环境最大的特点^[5]。残余自然或近自然植被是城市重要的生态资源,可以为城市提供多种生态系统服务功能^[6-7],例如在缓解城市热岛效应^[8],净化空气,涵养水源和生物多样性保护等方面发挥着至关重要的作用^[9]。目前,大量的研究表明城市化对城市动植物造成了严重的负面影响,加速了本土植物物种的灭绝^[4,10-11]。进一步了解城市残余自然或近自然植被对不同人为干扰方式及强度的响应,可为城市生态修复、植被恢复与重建以及物种多样性的保护提供理论依据。

已有的研究多集中于自然环境背景下物理和生物等干扰因素对动植物群落物种多样性的影响,如火灾、轮耕、放牧、封育、干旱、旅游等^[12-15]。在研究方法上,一些学者通过实验样地的设置划分干扰类型^[16],也有一些学者通过影响因子赋值、指标评价等方法进行干扰分级^[13,17]。贾真真等研究了风景区旅游干扰对杜鹃群落特征的影响,发现垃圾指数与杜鹃纯林多样性指数、物种数以及草本均呈显著负相关^[13]。大量研究表明物种多样性在中度干扰强度下达到峰值,验证了“中间干扰假说”理论,如 Biswas 等对加拿大西北部森林中受到人为干扰的 24 条小溪的研究表明物种丰富度、功能丰富度和多样性在中等干扰强度下达到峰值,物种丰富度和多样性模式取决于环境和系统^[18];Stevens 等对加利福尼亚州森林间伐和野火严重干扰梯度上林下植被自然实验的研究表明随干扰程度加大,冠层封闭程度降低,中间干扰促进不同生物地理亲和性物种共存,可提

高林下多样性^[19]。综上所述,目前已有的研究多集中于干扰对整体植物物种多样性的影响,而不同植物类型受物种组成、植被生理特征、群落结构等的影响^[20–22],因此对干扰的响应也可能不同。然而,在完全人工环境背景下的山地城市区域,目前关于干扰强度和干扰方式对城市遗存生境植被群落特征影响的研究鲜见报道。

中国是一个多山国家,山地占陆地总面积近 70%^[23],而黔中地区是全球喀斯特发育最典型、地形地貌和景观类型最复杂的多山区域,也是典型的生态环境脆弱区^[24]。贵阳市地处黔中岩溶中心地带,城市扩张过程中一些不宜开发建设的自然山体被镶嵌于城市基质中形成城市遗存山体,是城市人工建成环境中宝贵的自然资源,能为城市提供多种生态系统服务功能^[25–26],尤其是为居住在城市高空的居民提供良好的视觉资源。然而随着城市内部的致密化发展,这些城市遗存山体正在遭到人为干扰的严重破坏,部分山体被开挖进行道路和居住小区的建设亦或改造为公园等现象,导致山体面积萎缩、景观格局破碎化、植被衰退和生态系统服务功能持续下降等问题,对城市生物多样性的保护以及生态环境的健康可持续发展构成了严重威胁。人为干扰方式及其强度对城市遗存山体生境植物群落多样性的影响是否存在差异?对这一问题的探索关系着城市遗存山体生态修复、植被恢复和重建策略的制定,对多山城市绿地系统规划以及城市遗存山体自然资源保护和合理开发利用至关重要。因此,本研究选择黔中典型多山城市——贵阳市为研究区,城市遗存山体为研究对象,旨在探讨不同人为干扰方式及强度对城市遗存山体植被群落特征的影响。

1 研究区概况

贵阳市(北纬 26°11′至 26°55′,东经 106°07′至 107°17′)地处中国贵州省中部,是贵州的省会城市,地貌属于以山地、丘陵为主的喀斯特丘原盆地地区,海拔高度 880—1659 m,总地势西南高、东北低。气候类型属于亚热带湿润温和型,年平均气温为 15.3℃,年平均总降水量为 1129.5 mm,天然雨是贵阳市水资源的主要来源。贵阳境内地带性植被为中亚热带湿润性常绿阔叶林,其历史上野生动植物资源较丰富,土壤以酸性黄壤为主。截止 2020 年底,贵阳市中心建成区用地面积为 410.11 km²,常住人口 488.19 万人,建成区内镶嵌有 539 座喀斯特城市遗存山体。

2 研究方法

2.1 研究对象

以 2020 年的 Pleiades 卫星影像图(0.5 m 空间分辨率,含数字高程(DEM)图)为数据源,利用 ENVI 5.3 平台对数据进行几何校正、影像裁剪等预处理,作为城市遗存山体空间格局分析的数据源。通过目视解译,结合研究区地形图和实地考察识别提取研究区城市遗存山体斑块。参照邢龙等相关研究^[27],以城市遗存山体斑块类型(大、中、小)为主,随机选取 27 座样山作为本研究对象(图 1),城市遗存山体基本信息见(表 1)。

2.2 植物群落样地设置与调查

每座样本山体按照坡向+坡位组合法设置 12 个样点(即东、南、西、北 4 个方向按山顶、山腰、山脚各设置 1 个样点,如图 2 所示)。在 ArcGIS 10.2 软件中确定遗存山体山顶中心位置以及测量各方向垂直投影距离,以山顶为中心分别向东、南、西、北四个方向延伸,等间距在山顶、山腰(山顶至山坡坡面的中间位置)、山脚各方向各设置一个样点。各样点设置 30 m×30 m 的样地,每个样地按 5 点法设置 5 个 10 m×10 m 的乔木样方,在乔木样方按 5 点法各设置 5 个 3 m×3 m 的灌木样方,在灌木样方内随机设置 1 m×1 m 的草本样方,去除因山体被开采挖掘、岩石裸露严重、人为干扰程度严重等无法取样的样地,共计有效调查样地 246 个。通过植物群落学调查方法对山体植被进行实地调查,调查内容为每个样地的地理坐标、经纬度、海拔、坡向及样地周围环境等信息。样方内的群落调查内容为:乔木种名、数量、高度、胸径、冠幅等;灌木(包括小乔木)的种名、高度、冠径、株数等;草本的种名、株数或盖度等。参考中国植物志(<https://www.plantplus.cn/cn>)与《贵州植物志》对乡土植物与外来植物物种进行统计与定量分析。

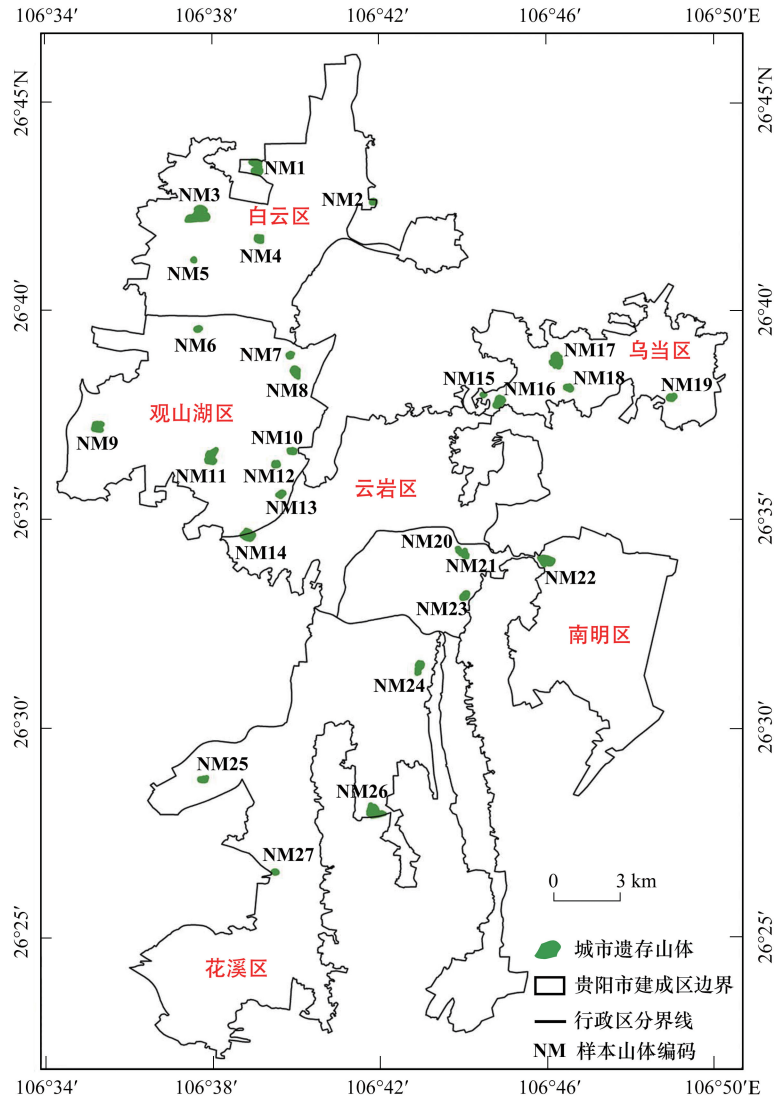


图1 研究区位置与研究对象
Fig.1 Location and object of study

表1 城市遗存山体基本信息
Table1 Basic information statistics of URM

编号 Number	经纬度 Latitude and longitude	面积/hm ² Area	相对高度/m Relative height	乔灌投影面积/hm ² Trees and Shrubs area	草投影面积/hm ² Herbs area
NM1	26°43'22.82"N; 106°39'00.55"E	15.71	45	1.82	4.51
NM2	26°42'34.38"N; 106°41'47.37"E	2.68	25	0.84	0.21
NM3	26°42'13.04"N; 106°37'33.22"E	29.31	61	6.66	12.14
NM4	26°41'39.54"N; 106°39'02.93"E	5.33	20	3.29	0.32
NM5	26°41'09.82"N; 106°37'28.68"E	1.17	6	0.79	0.03
NM6	26°39'30.19"N; 106°37'34.82"E	2.53	11	1.58	0.16
NM7	26°38'51.42"N; 106°39'47.42"E	2.98	30	1.35	0.26
NM8	26°38'27.87"N; 106°39'54.50"E	8.31	64	3.35	0.72
NM9	26°37'08.98"N; 106°35'10.84"E	10.06	36	2.91	1.12
NM10	26°36'25.88"N; 106°37'52.45"E	14.19	17	8.45	1.00
NM11	26°36'34.64"N; 106°39'50.14"E	3.76	35	2.22	0.12

续表

编号 Number	经纬度 Latitude and longitude	面积/hm ² Area	相对高度/m Relative height	乔灌投影面积/hm ² Trees and Shrubs area	草投影面积/hm ² Herbs area
NM12	26°36'14.81"N; 106°39'26.22"E	3.47	26	2.48	0.12
NM13	26°35'32.11"N; 106°39'33.34"E	3.98	42	1.78	0.26
NM14	26°37'55.21"N; 106°44'26.27"E	13.72	99	4.48	2.28
NM15	26°41'58.27"N; 106°37'19.08"E	1.20	30	0.89	0.05
NM16	26°37'45.29"N; 106°44'48.18"E	10.29	63	7.10	0.24
NM17	26°38'44.17"N; 106°46'13.09"E	15.95	72	9.36	0.46
NM18	26°38'05.40"N; 106°46'29.22"E	4.23	39	2.18	0.23
NM19	26°37'51.65"N; 106°48'56.90"E	4.85	38	1.62	0.22
NM20	26°34'09.96"N; 106°43'51.80"E	2.64	23	1.55	0.12
NM21	26°34'04.02"N; 106°43'00.57"E	3.74	45	1.77	0.09
NM22	26°33'57.27"N; 106°45'57.95"E	14.25	59	8.05	1.58
NM23	26°33'04.75"N; 106°43'00.12"E	5.47	49	3.67	0.15
NM24	26°31'25.17"N; 106°42'53.92"E	7.44	44	3.72	0.09
NM25	26°28'40.16"N; 106°37'42.16"E	4.02	31	1.84	0.47
NM26	26°27'54.10"N; 106°41'48.24"E	17.62	45	9.63	1.44
NM27	26°26'26.65"N; 106°39'25.91"E	2.22	13	1.15	0.10

表中 NM 为样本山体编码

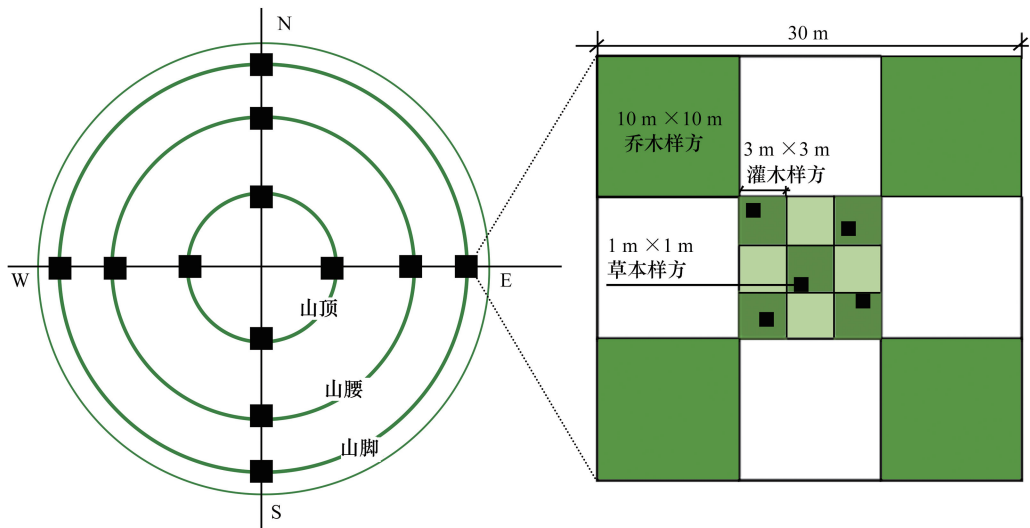


图 2 城市遗存山体植物群落样地样方调查设置示意图
Fig.2 The sample set of plant community in URMs

2.3 群落特征指标

2.3.1 植被覆盖度(FVC)和净初级生产力(NPP)数据来源及测算

采用分辨率 30 m 的 Landsat 8 OIL 数据(2020 年 5 月 14 日和 6 月 28 日两期影像),利用 ENVI 5.3 平台对数据进行辐射纠正、大气校正、影像裁剪等预处理,2020 年的气象数据(降水数据、温度数据、辐射数据)来源于中国气象局,作为计算植被覆盖度(FVC)和净初级生产力(NPP)的数据源。

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \tag{1}$$

$$NPP(x, t) = APAP(x, t) \times \varepsilon(x, t) \tag{2}$$

式中,NDVI_{soil}为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值,NDVI_{veg}则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI

值。采用 CASA 模型估算 NPP,利用 ArcGIS 10.2 软件中的克里金插值和栅格计算器对气象资料和遥感数据进行处理,APAR(x,t)表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($\text{g C}/\text{m}^2$), $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率($\text{g C}/\text{MJ}$),植被 NPP 及植被覆盖度计算静态参数设置在 ENVI 5.3 软件中完成,模型中数据计算方法及参数来源详见文献^[28—31]。

2.3.2 植物群落物种多样性指数与测算

采用 Margalef 物种丰富度指数(R),反映植物群落中物种的丰富程度;采用 Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、和 Pielou 指数(Jh)体现植物物种数量、结构和分布均匀程度的综合量化指标。各指数分别为:

$$R = (S - 1) / \ln N \tag{3}$$

$$H' = - \sum P_i \lg(P_i) \tag{4}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{5}$$

$$Jh = H' / \ln S \tag{6}$$

式中, N 为总个体数量; S 为总物种数量; $\ln$ 为以 e 为底的自然对数; $\lg$ 为以 10 为底的对数; $P_i = n_i / N$, n_i 表示第 i 个物种的个体数量。

2.4 人为干扰方式及强度计算方法

在前述遥感影像解译的基础上,结合实地调查,识别提取出各城市遗存山体内部景观类型,借鉴前人相关研究^[27,32],把城市遗存山体内部景观类型分为自然景观(自然植被、水面、裸地)和人工景观(农林地、建筑物、构筑物、人工裸地、边坡、道路)2 大类 9 小类并进行属性赋值。以城市遗存山体人为干扰景观类型斑块面积占比的最大值来确定出各山体主要的人为干扰方式(见表 2)。为合理量化 27 座城市遗存山体人为干扰的强度,通过德尔菲法对人为干扰方式及干扰内容进行专家打分(专家由生态学、风景园林学、水土保持与荒漠化防治、森林保护、森林经理和城乡规划专业背景的教授、副教授、博士等 22 人组成),得到各指标权重值(见表 3)。

表 2 城市遗存山体主要人为干扰方式及干扰内容

Table 2 Main artificial disturbance ways and disturbance contents of URMIs

人为干扰方式 Artificial disturbance ways	人为干扰内容 Artificial disturbance content	干扰形式 Artificial disturbance form
人为踩踏 Trample	小径、墓地踩踏、泥土裸露、岩石裸露	践踏
复垦 Reclamation	菜地、农田、苗圃培育、实验种植园	翻新平整
工程建设 Engineering construction	硬质地基、建筑物、隧道、公路、铁路	开挖浇筑
构筑物 Structures	电塔、电线杆、信号塔、围墙、水池、墓碑、废弃设备房等	建设
工程开挖 Engineering excavation	硬质防护、绿植性防护、边坡开挖性泥土裸露	开挖
公园化利用 Park utilization	园路、景观建筑、活动场地、构筑物设施、水体	建设

表 3 人为干扰方式及干扰内容指标权重值

Table 3 indicator weight values of Artificial disturbance ways and disturbance contents

干扰方式 disturbance ways	指标 Indicators	权重 Weight	干扰方式 disturbance ways	指标 Indicators	权重 Weight	干扰方式 disturbance ways	指标 Indicators	权重 Weight
人为踩踏 Trample	小径	0.02	复垦 Reclamation	农田	0.05	公园化利用 Park utilization	园路	0.04
	泥裸	0.02		菜地	0.05		构筑物等设施	0.03
	岩裸	0.03		苗圃培育	0.06		景观建筑	0.04
工程建设 Engineering construction	建筑物、硬质地基	0.07	工程开 excavation	绿化护坡	0.05		活动场地	0.06
	隧道	0.06	挖 Engineering	硬化护坡	0.09	构筑物 Structures	电塔、围墙、水池	0.09
	公路、铁路	0.05		挖方	0.11		墓碑、废弃设施房	0.08

最终以各城市遗存山体人为干扰景观面积加权求和值的大小来确定人为干扰强度。人为干扰强度 (ADI) 计算公式如下:

$$ADI = \frac{H_i(A_1 + A_2 + \cdots A_n)}{A} \times 100 \quad (7)$$

式中: ADI 为人为干扰强度; H_i 为第 i 种人为干扰方式的权重系数; A_n 为遗存山体内部第 n 种人为干扰景观斑块面积; A 为城市遗存山体的垂直投影面积。

2.5 数据处理

本研究植物群落数据库构建及多样性指数相关指标在 Excel 2010 中进行整理和计算; 在 SPASS 22.0 软件中采用单因素方差分析法和最小显著差异法 (LSD) 比较不同山体、不同人为干扰强度和不同干扰方式间植物多样性的差异, 显著性水平 $P=0.05$; 利用 Origin 2021 软件制图, 图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

3 结果

3.1 城市遗存山体人为干扰方式与干扰强度

基于实地调查结果与遥感影像解译数据, 以城市遗存山体内部人为干扰景观类型的最大面积占比来确定不同城市遗存山体主要的人为干扰方式 (图 3), 结果表明 27 座城市遗存山体受到的人为干扰方式主要有复垦、公园化利用、工程开挖、工程建设、构筑物建设、人为踩踏 6 种。

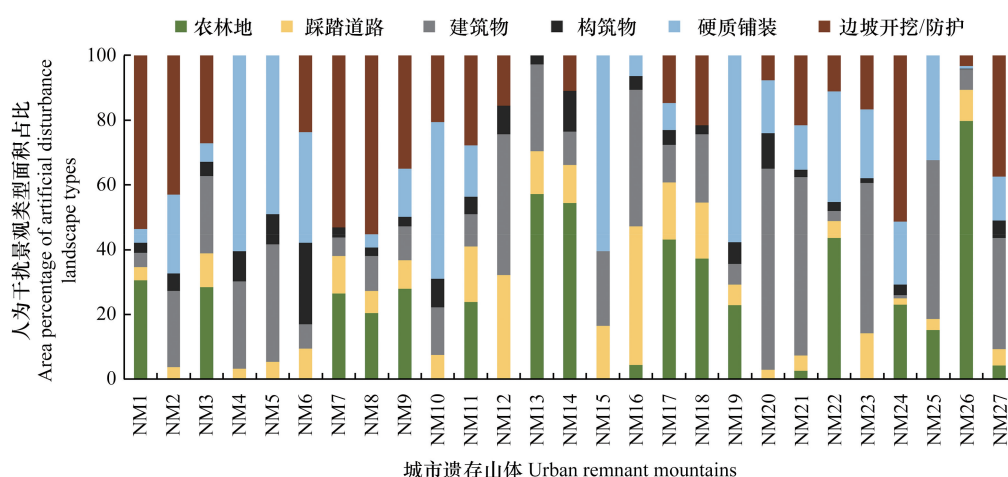


图 3 城市遗存山体内部人工干扰景观类型面积占比

Fig.3 Proportion of artificial disturbance landscape types in URM

采用自然断点法把人为干扰强度值划分为 3 个等级, 分别为重度人为干扰 ($ADI>6.0$)、中度人为干扰 ($4.5\leq ADI\leq 6.0$) 和轻度人为干扰 ($ADI<4.5$), 其中重度、中度和轻度人为干扰城市遗存山体分别为 10 座、8 座与 9 座。图 4 可以看出不同人为干扰方式的干扰强度各不相同, 复垦各种人为干扰强度均有, 而工程开挖仅表现为重度人为干扰, 工程建设有重度和中度人为干扰强度, 构筑物建设有中度和轻度两种强度, 但以中度人为干扰强度为主, 人为踩踏和公园化利用多为中度和轻度人为干扰强度, 其中人为踩踏以轻度人为干扰强度为主。

3.2 不同人为干扰方式及强度对城市遗存山体植被特征的影响

图 5 为不同人为干扰方式及强度下城市遗存山体植被覆盖度 (FVC) 和净初级生产力 (NPP) 的测算结果。整体上, 不同人为干扰强度下城市遗存山体 FVC 值呈现为中度人为干扰 > 轻度人为干扰 > 重度人为干扰, 而 NPP 值则呈现为中度人为干扰 > 重度人为干扰 > 轻度人为干扰。不同干扰等级各城市遗存山体间的 FVC 和

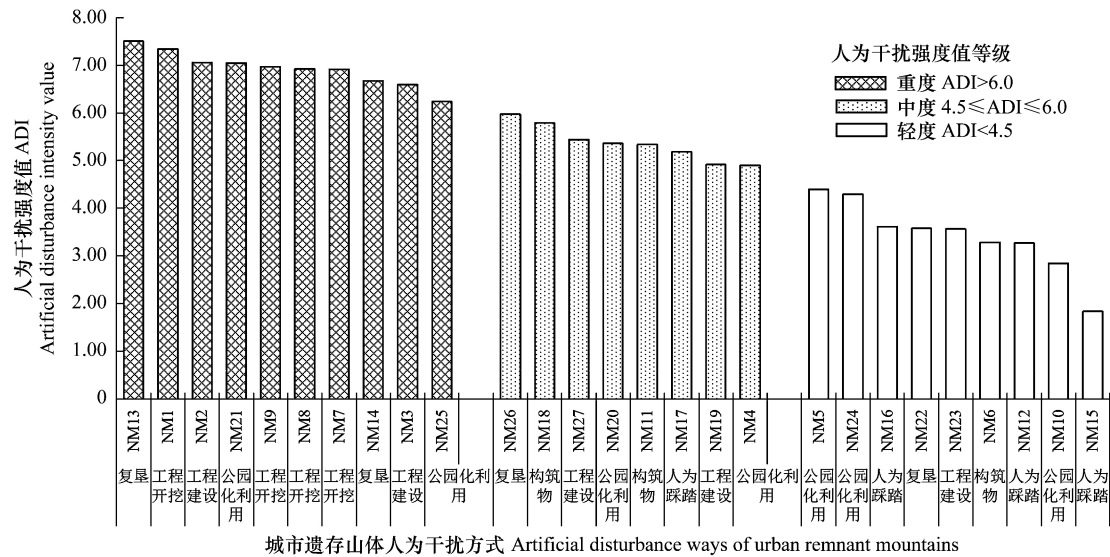


图 4 城市遗存山体人为干扰强度值与等级划分

Fig.4 Artificial disturbance intensity and ranking of URMs

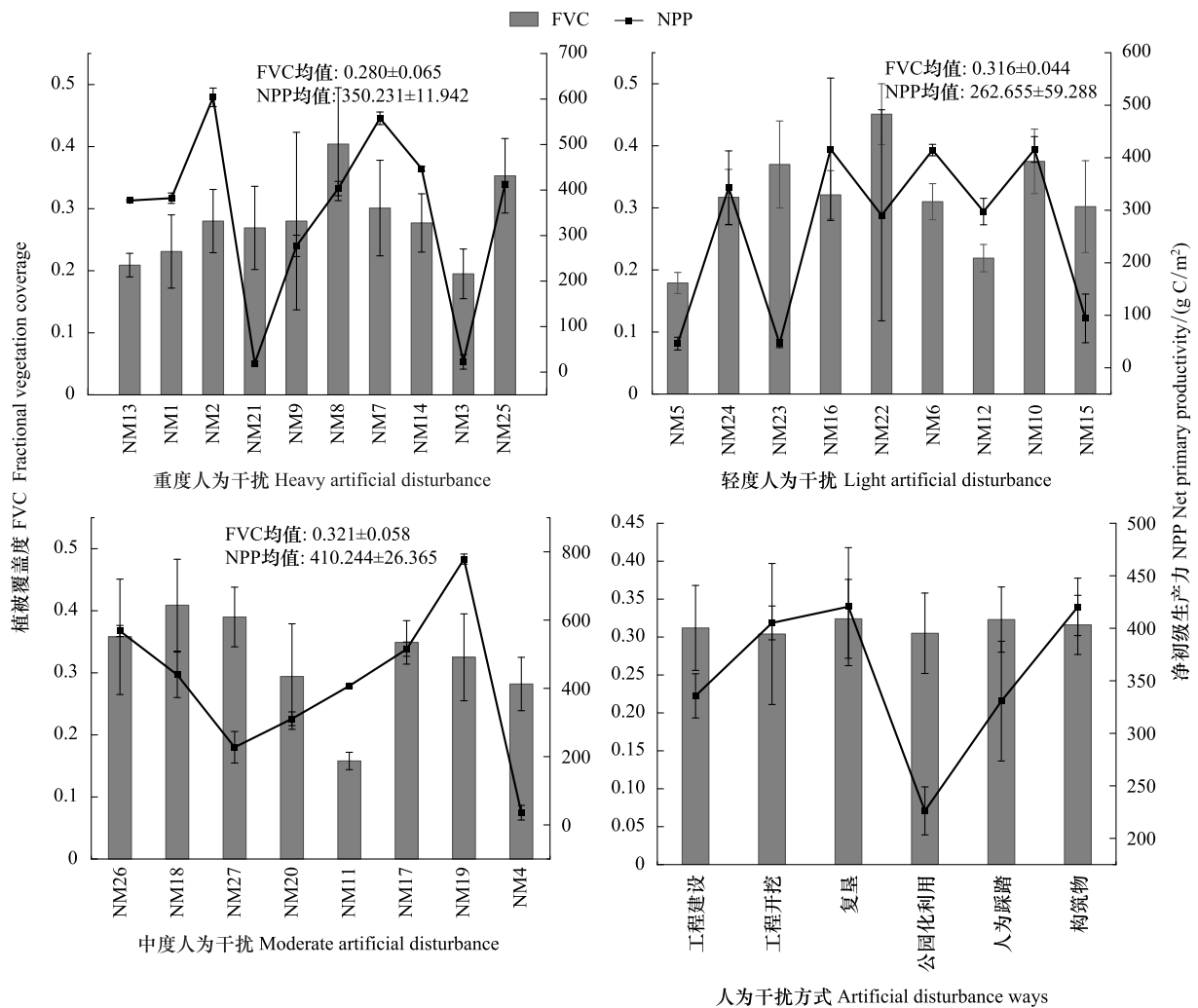


图 5 不同人为干扰方式及强度下城市遗存山体 FVC 和 NPP

Fig.5 FVC and NPP of URMs under different artificial disturbance ways and intensity

NPP 值存在着较大的差异,且不具有完全一致性,个别城市遗存山体存在完全相反的现象。如在重度干扰等级,NM21 植被覆盖度中等,但 NPP 最低;中度干扰等级,NM11 山体 FVC 值最低,而 NPP 值相对较高;在轻度干扰等级,NM5 的 FVC 和 NPP 值均为最低,NM23 完全相反。实地调查发现 NM21 (3.74 hm²) 为寺院型公园化利用山体,大型佛教建筑分布在山腰和山顶;NM11 受到了多种复合型人为活动的干扰;NM5 (1.17 hm²) 为小型公园化利用山体,山顶大面积的活动场地导致该山体的植被覆盖度较低。不同干扰方式下 FVC 值总体上为复垦>人为踩踏>构筑物>工程建设>公园化利用>工程开挖,而 NPP 则为复垦>构筑物>工程开挖>工程建设>人为踩踏>公园化利用。其中,复垦干扰下 FVC 和 NPP 值均为最高;与之相反,公园化利用具有较低的 FVC 值,且植被 NPP 值与其它几种干扰方式相比为最低。

3.3 不同人为干扰方式及强度对城市遗存山体植物群落物种组成的影响

3.3.1 不同人为干扰强度对城市遗存山体植物群落物种组成的影响

由表 4 可以看出不同人为干扰强度下城市遗存山体平均物种数整体上呈现为轻度人为干扰(185 种)>中度人为干扰(165 种)>重度人为干扰(155 种)。经单因素方差分析法分析可知,轻度与中度和重度人为干扰

表 4 不同人为干扰强度下城市遗存山体植物群落物种组成

Table 4 Species compositions of plant community of URMs under different artificial disturbance intensities

编号 Numbers	干扰方式 Disturbance ways	种 Species	科 Families	属 Genus	乡土植物 Native plant	外来物种 Alien species
NM13	复垦	168	73	152	114(68%)	54(32%)
NM1	工程开挖	158	75	138	101(64%)	57(36%)
NM2	工程建设	167	75	150	115(69%)	52(31%)
NM21	公园化利用	127	74	117	81(64%)	46(36%)
NM9	工程开挖	122	53	112	86(70%)	36(30%)
NM8	工程开挖	160	70	140	116(72%)	44(28%)
NM7	工程开挖	178	81	160	119(67%)	59(33%)
NM14	复垦	178	70	161	128(72%)	50(28%)
NM3	工程建设	141	63	123	107(76%)	34(24%)
NM25	公园化利用	150	65	125	104(69%)	46(31%)
重度干扰均值 Heavy disturbance mean		155±19.717b	70±7.88a	138±17.850b	107±14.685b	48±8.311a
NM26	复垦	135	65	125	90(67%)	45(33%)
NM18	构筑物	167	71	150	123(74%)	44(26%)
NM27	工程建设	237	94	207	155(65%)	82(35%)
NM20	公园化利用	186	78	162	124(67%)	62(33%)
NM11	构筑物	147	67	132	108(73%)	39(27%)
NM17	人为踩踏	152	76	142	105(69%)	47(31%)
NM19	工程建设	179	70	147	112(62%)	67(38%)
NM4	公园化利用	119	59	103	81(68%)	38(32%)
中度干扰均值 Moderate disturbance mean		165±36.515ab	73±10.569a	146±30.463ab	112±22.752ab	53±15.675a
NM5	公园化利用	182	83	162	129(71%)	53(29%)
NM24	公园化利用	171	72	149	111(65%)	60(35%)
NM23	工程建设	136	66	120	99(73%)	37(27%)
NM16	人为踩踏	174	75	152	126(72%)	48(28%)
NM22	复垦	160	64	146	114(71%)	46(29%)
NM6	构筑物	220	87	195	157(71%)	63(29%)
NM12	人为踩踏	192	76	169	131(68%)	61(32%)
NM10	公园化利用	218	83	184	143(65%)	75(35%)
NM15	人为踩踏	210	93	187	137(65%)	73(35%)
轻度干扰均值 Light disturbance mean		185±28.150a	78±9.644a	163±23.801a	127±17.622a	57±12.540a

同列均值相同字母表示无显著差异,不同字母表示有显著差异($P<0.05$)

强度之间存在着显著性差异 ($P<0.05$), 而中度和重度人为干扰强度之间无显著性差异。不同干扰强度下物种均以乡土植物为主, 乡土和外来植物占比接近 2:1, 随着干扰程度的增加乡土植物呈现为逐渐递减的趋势。不同人为干扰等级各样山间物种数存在较大差异, 其中在重度干扰等级, NM9 物种数明显低于其它山体; 在中度干扰区间, NM4 物种数量最低, 仅 119 种, 远低于该等级的平均物种数 (165 种); 在轻度干扰等级, NM23 物种数最低。

3.3.2 不同人为干扰方式对城市遗存山体植物群落物种组成的影响

由图 6 可以看出, 不同干扰方式下城市遗存山体植物群落物种组成无显著性差异 ($P<0.05$), 城市遗存山体植物群落平均物种数总体上呈现为人为踩踏>构筑物>工程建设>公园化利用>复垦>工程开挖。其中, 人为踩踏干扰方式下平均科属种数量明显高于其它几种干扰方式, 而工程开挖和复垦干扰方式下的平均科属种数量明显低于其它几种干扰方式。不同干扰方式下植物群落物种也均以乡土植物为主, 整体来看, 人为踩踏干扰方式下城市遗存山体的乡土和外来植物的平均物种数最多, 而构筑物建设的外来植物平均物种数最少。

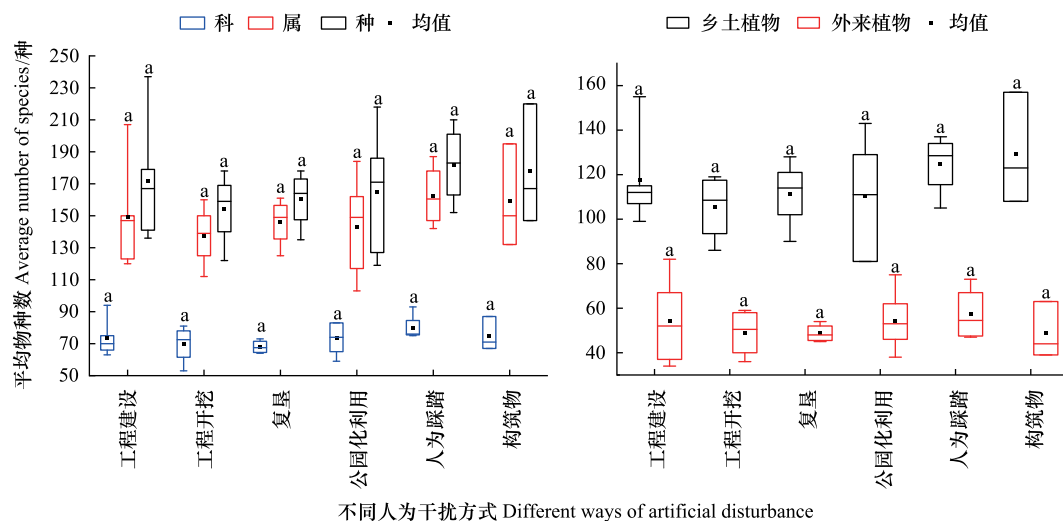


图 6 不同人为干扰方式下城市遗存山体植物群落物种组成

Fig.6 Species compositions of plant community of URMs under different artificial disturbance ways

相同字母表示无显著性差异, 不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)

3.3.3 不同人为干扰方式及强度下城市遗存山体植物群落生活型构成

表 5 表明: 不同干扰强度下城市遗存山体植物群落各生活型的平均物种数整体上呈现为草本>灌木>乔木>藤本。除重度人为干扰下常绿乔木和落叶乔木的平均物种数与轻度人为干扰下存在着显著性差异外 ($P<0.05$), 其它层次物种数在不同人为干扰强度下无显著性差异。其中, 轻度、中度和重度人为干扰强度下城市遗存山体常绿乔木: 落叶乔木分别为 1:1.92、1:1.76、1:2.23, 均以落叶乔木树种为主; 常绿灌木: 落叶灌木分别为 1:1.02、1:0.9、1:0.96。在重度人为干扰下常绿灌木与落叶灌木的占比相同, 而轻度和中度人为干扰下则以常绿灌木为主; 常绿藤本: 落叶藤本分别为 1:2.04、1:2.24、1:2.02, 均以落叶藤本为主; 一二年生草本和多年生草本比值分别为 1:1.4、1:1.69、1:1.52, 均以多年生草本为主。

由不同人为干扰方式下城市遗存山体植物群落生活型构成图 (图 7) 可知, 群落各生活型层平均物种数整体上呈现为多年生草本>一、二年生草本>落叶乔木>常绿灌木>落叶灌木>落叶藤本>常绿乔木>常绿藤本。单因素方差分析法分析结果表明, 常绿乔木的平均物种数在工程开挖干扰方式与公园化利用干扰方式之间存在着显著性差异 ($P<0.05$); 而复垦干扰方式下常绿灌木和落叶灌木的平均物种数与工程建设、公园化利用和构筑物建设等干扰方式存在显著差异 ($P<0.05$)。其中, 乔木层在各干扰方式下均以落叶乔木为主, 公园化利用干扰方式下常绿树种占比最高; 灌木层在复垦方式下以落叶灌木为主, 而其它干扰方式下则以常绿灌木为

主;草本层的各干扰方式均以多年生草本为主,工程建设干扰下多年生草本占比最高,人为踩踏和公园化利用干扰下最低;然而藤本植物在不同干扰方式下存在较大相似性。

表 5 不同人为干扰强度下城市遗存山体植物群落生活型组成/种

Table 5 Compositions of life forms of plant community URM s under different artificial disturbance intensities

编号 Numbers	乔木 Trees		灌木 Shrub		草本 Herbaceous		藤本 Liana	
	常绿 Evergreen	落叶 Deciduous	常绿 Evergreen	落叶 Deciduous	一/二年生 Annual/ Biennial	多年生 Perennial	常绿 Evergreen	落叶 Deciduous
NM13	7	23	18	12	33	54	4	9
NM1	9	18	14	16	28	43	5	12
NM2	9	18	12	22	29	46	7	12
NM21	10	13	13	16	17	28	7	11
NM9	3	14	12	15	26	29	7	11
NM8	9	20	22	21	17	42	6	13
NM7	10	21	20	16	30	48	6	10
NM14	7	14	16	16	44	55	5	14
NM3	8	14	21	17	26	43	3	6
NM25	7	21	16	17	25	29	7	17
重度均值 Heavy mean	8±2.079b	18±3.627b	16±3.718a	17±2.860a	28±7.764a	42±10.001a	6±1.418a	12±2.953a
常绿/落叶 Evergreen/deciduous	1:2.23		1:1.02		1:1.52		1:2.02	
NM26	12	18	6	13	23	40	5	6
NM18	9	16	19	21	29	46	6	13
NM27	19	29	29	22	31	61	8	22
NM20	13	20	24	14	33	41	7	15
NM11	7	18	21	17	20	42	5	10
NM17	8	22	17	13	28	37	6	10
NM19	12	25	20	20	24	51	2	10
NM4	12	14	13	14	15	26	3	8
中度均值 Moderate mean	12±3.742ab	20±4.921ab	19±6.948a	17±3.770a	25±6.022a	43±10.254a	5±1.982a	12±4.979abhdw
常绿/落叶 Evergreen/deciduous	1:1.76		1:0.9		1:1.69		1:2.24	
NM5	20	29	17	16	25	43	7	11
NM24	12	20	21	17	40	42	5	8
NM23	6	15	18	15	16	36	7	13
NM16	15	20	17	16	27	39	5	17
NM22	7	22	7	15	39	47	4	11
NM6	8	32	26	25	35	51	7	19
NM12	7	17	14	13	49	60	7	12
NM10	17	22	28	20	39	60	6	11
NM15	15	28	23	28	30	43	9	14
轻度均值 Light mean	12±5.110a	23±5.718a	19±6.403a	18±5.050a	33±9.862a	47±8.628a	6±1.500a	13±3.371a
常绿/落叶 Evergreen/deciduous	1:1.92		1:0.96		1:1.4		1:2.04	

3.4 不同人为干扰方式及强度对城市遗存山体不同层次植物群落物种多样性的影响

3.4.1 不同人为干扰强度对城市遗存山体不同层次物种多样性的影响

图 8 可以看出不同干扰强度下城市遗存山体乔木层物种多样性 4 种指数均偏低。城市遗存山体植物群落物种多样性 Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、丰富度 Margalef 指数(R)均呈现为中度人为干扰>轻度人为干扰>重度人为干扰,而 Pielou 指数(J_h)则为轻度人为干扰>中度人为干扰>重度人为干扰。LSD

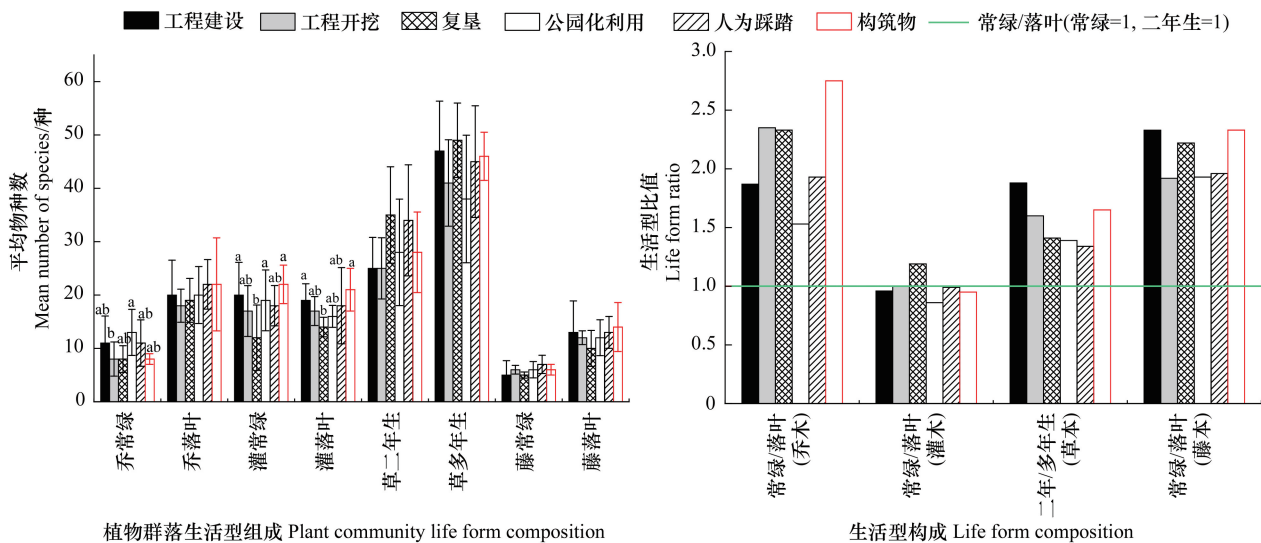


图 7 不同人为干扰方式下城市遗存山体植物群落生活型构成分析

Fig.7 Composition of life forms of plant community URMs under different artificial disturbance ways

有字母表示具有显著性差异,无字母表示无显著性差异($P < 0.05$)

比较分析结果表明不同人为干扰强度下城市遗存山体间均存在着显著性差异($P < 0.05$),尤其重度人为干扰下的 R 、 H' 、 D 指数显著低于轻度和中度人为干扰,而在中度人为干扰强度下物种多样性数值最大。

图 9 表明城市遗存山体灌木层物种多样性 H' 、 D 和 J_h 指数整体上均为中度人为干扰 > 重度人为干扰 > 轻度人为干扰,而丰富度指数 R 则为中度人为干扰 > 轻度人为干扰 > 重度人为干扰。其中,中度人为干扰强度下灌木层 R 和 H' 指数显著高于轻、重度人为干扰,而轻度干扰下 H' 、 D 和 J_h 指数显著低于中、重度人为干扰。轻度人为干扰强度下各城市遗存山体间物种多样性差异性最大,而在中度人为干扰强度下各城市遗存山体物种多样性差值最小。

由图 10 可以看出,城市遗存山体的草本层在不同干扰强度之间的 H' 、 D 和 R 指数均为轻度人为干扰 > 重度人为干扰 > 中度人为干扰, J_h 指数则为轻度人为干扰 > 中度人为干扰 > 重度人为干扰。其中,轻度人为干扰强度下物种多样性 4 个指数的平均值显著大于中、重度人为干扰,且均具有极显著性差异,重度与轻度干扰 R 和 J_h 指数具有显著性差异。

3.4.2 城市遗存山体不同层次物种多样性对人为干扰方式的响应

图 11 表明:乔木层在不同人为干扰方式下物种多样性指数存在较大差异。其中 H' 值大小排序为人为踩踏 > 公园化利用 > 工程建设 > 复垦 > 构筑物 > 工程开挖; D 值表现为人为踩踏 > 工程建设 > 公园化利用 > 复垦 > 工程开挖 > 构筑物; J_h 值大小顺序为人为踩踏 > 复垦 > 工程建设 > 公园化利用 > 工程开挖 > 构筑物; R 值表现为工程建设 > 公园化利用 > 人为踩踏 > 复垦 > 构筑物 > 工程开挖。人为踩踏干扰方式下乔木 H' 、 D 和 J_h 明显高于其它干扰方式,而公园化利用和工程建设干扰之下无明显差异;构筑物建设和工程开挖干扰下乔木层 4 种指数显著低于其它几种干扰方式;人为踩踏和公园化利用干扰下 4 种指数有一定差异,但差异不明显。

灌木层在不同人为干扰方式下的物种多样性指数也具有不同程度差异, H' 、 D 和 R 的大小均为构筑物 > 人为踩踏 > 工程建设 > 公园化利用 > 工程开挖 > 复垦;其中构筑物建设干扰下 H' 、 D 和 R 极显著高于其它几种人为干扰方式,而复垦干扰下物种多样性指数显著低于其它几种人为干扰方式,人为踩踏、工程建设和公园化利用干扰方式下 H' 、 D 和 R 有一定差异,但差异不明显。不同人为干扰方式下的 J_h 表现为构筑物 > 人为踩踏 > 复垦 > 工程建设 > 公园化利用 > 工程开挖。总体来看,在工程开挖和复垦方式下乔木层物种多样性指数最低。

不同干扰方式下草本层的物种多样性指数与乔木、灌木层表现出明显的不一致性,其中 H' 和 D 的大小表

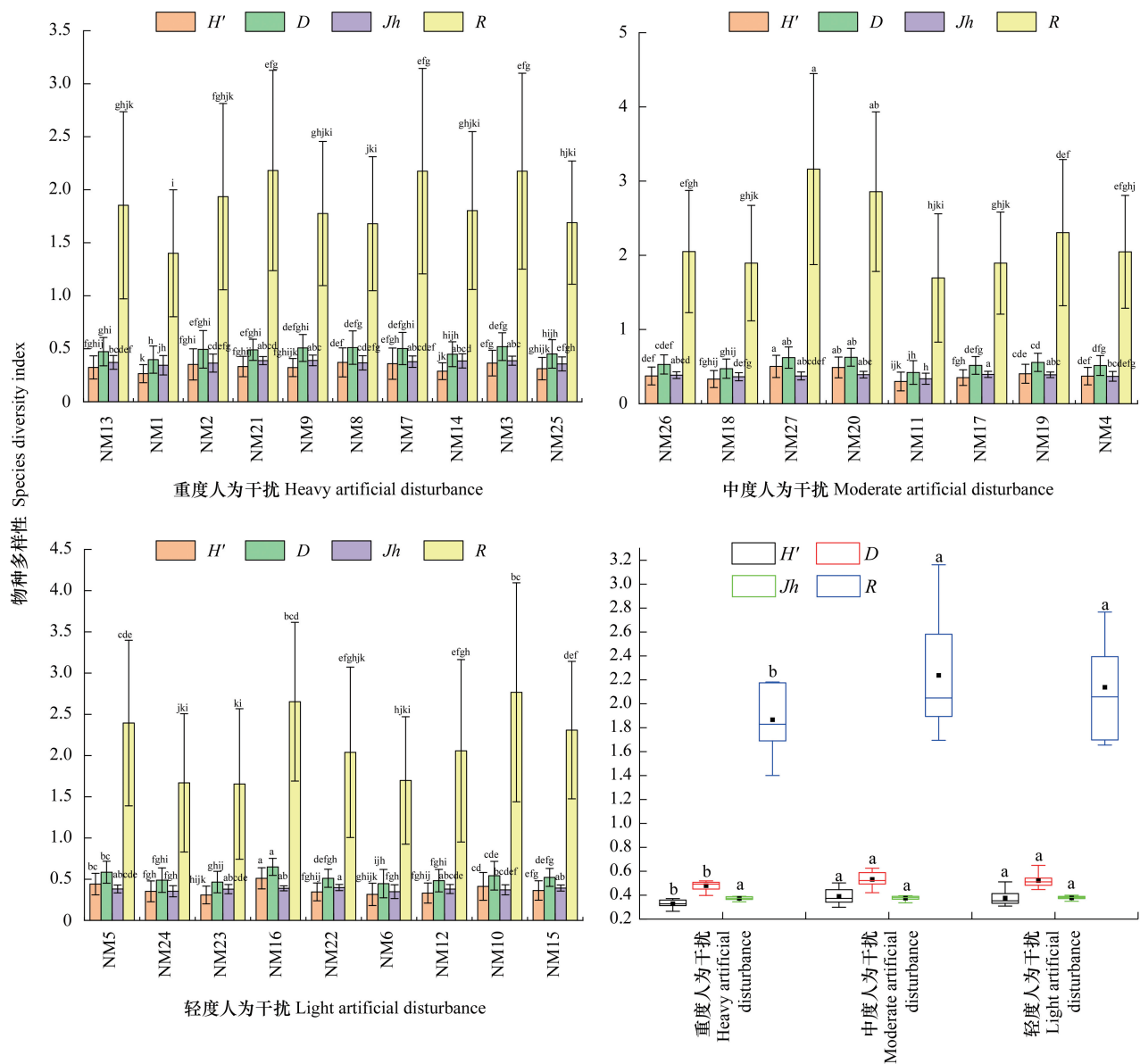


图8 不同人为干扰强度下城市遗存山体乔木层物种多样性

Fig.8 Species diversity of trees layer URMs under different artificial disturbance intensity

H' 为 Shannon-Wiener; D 为 Simpson; J_h 为 Pielou; R 为 Margalef; 相同字母表示无显著性差异,不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)

现出人为踩踏>构筑物>公园化利用>复垦>工程开挖>工程建设; J_h 表现为人为踩踏>公园化利用>构筑物>工程开挖>复垦>工程建设; R 呈现出人为踩踏>构筑物>复垦>公园化利用>工程建设>工程开挖。草本层各多样性指数均表现出人为踩踏干扰方式下最高,并与其它几种干扰方式具有显著性差异,其次为构筑物建设干扰下的多样性指数值较高,工程建设和工程开挖干扰下最低。

4 讨论

4.1 不同人为干扰强度对城市遗存山体植被群落特征的影响

物种多样性变化与生境紧密相关,人类活动引起的土地利用变化是导致物种栖息地破碎化、物种被隔离的主要原因^[33-34]。与平原城市不同,山地区域城市形态结构较大程度受自然地形的制约^[35],这促使山地城市在扩张过程中,大量自然山体生境被镶嵌在城市人工基质中,在城市人工环境中形成生态孤岛并持续不断

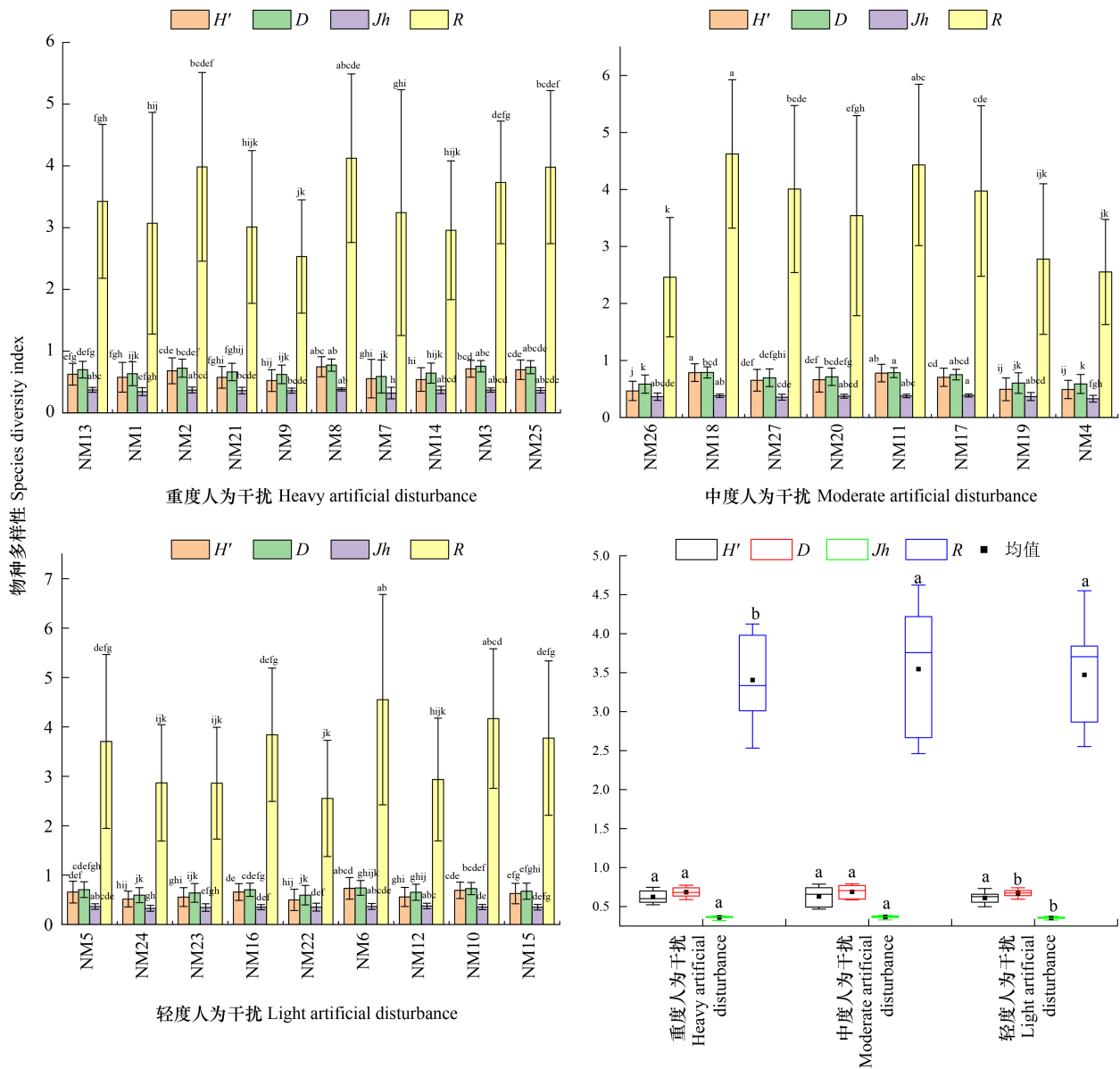


图9 不同人为干扰强度下城市遗存山体灌木层物种多样性

Fig.9 Species diversity of shrubs layer URMs under different intensity of artificial disturbance

的受到人为干扰的影响^[36]。多山城市的开发建设易受自身地形地势的影响,已有研究表明城市遗存山体的斑块类型及特征对人为开发利用方式的选择具有重要的影响^[37]。在本研究中,不同干扰强度下城市遗存山体 FVC 和 NPP 值存在着较大的差异,且不具有完全一致性,个别山体存在完全相反的现象,这可能与不同干扰强度下的干扰方式有关。如重度干扰 NM21(3.74 hm²)为寺院型公园化利用山体,大型佛寺建筑分布在山腰和山顶,导致该山体原生植被遭受到了严重的干扰破坏,建筑旁虽有人工种植的乔木可以增补山体植被覆盖度,但较大面积的人工硬化往往会掩盖植被覆盖所产生的生态环境效益,这可能促使 NPP 值较低。在中度干扰下,如 NM11 山体受到了多种干扰方式的复合叠加,山体内部遗留了大量的废弃农用房,水泵房,电塔等构筑设施,局部区域存在较严重的土壤和岩石裸露,加之乔木遭到了大量的破坏,导致该山体整体植被覆盖度较低,然而大面积农田蔬菜的种植,其良性循环的生态系统可能在一定程度上提高了植被的初级生产力。在轻度干扰强度下, NM5(1.17 hm²)为小型公园化利用山体,山顶大面积的活动场地导致该山体的植被覆盖度

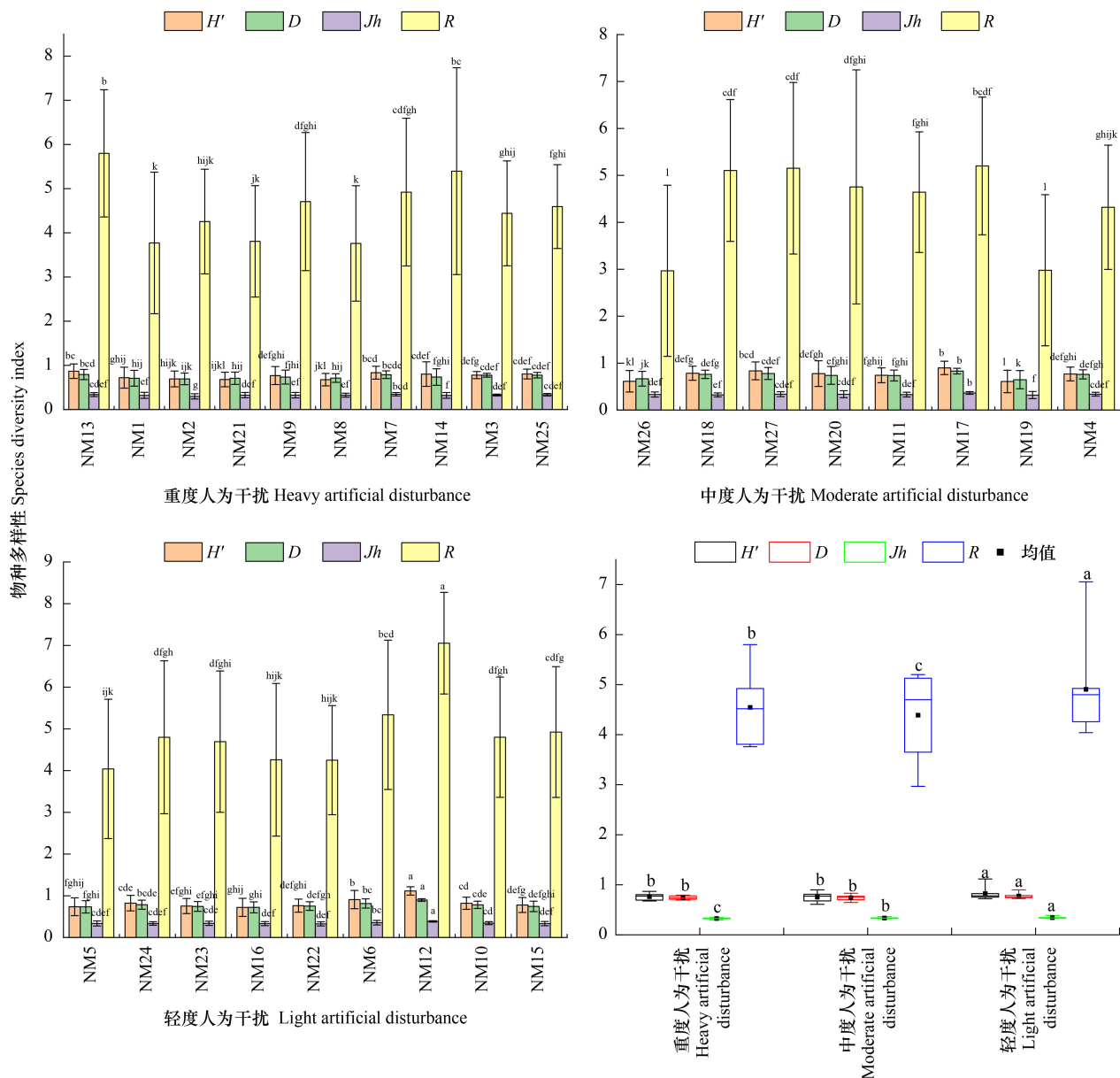


图 10 不同人为干扰强度下城市遗存山体草本层物种多样性

Fig.10 Species diversity of herbs layer of URMs under different intensity of artificial disturbance

较低,加之山体面积积极小,这可能导致了植被覆盖度和初级生产力均低于其它山体。

本研究结果发现不同人为干扰强度下,植物群落不同生活型构成占比存在差异性。其中,乔木层在中度干扰强度常绿落叶比值最低,灌木层在重度干扰强度下的常绿与落叶的比值与轻、中度干扰强度下不同,藤本层在不同干扰强度下比值较为相似,而多年生草本在中度干扰强度占比最高。植物本身特性的差异导致了在面对干扰时不同生活型物种组成响应程度不同,这取决于干扰对植物群落生境及土壤环境的改变程度,以及物种对干扰胁迫的适应能力^[22,38-39]。例如,一些山体內的植物多为园林绿化树种,为了营造较为美观的植物绿化景观,人为改变了城市遗存山体生境内的植物群落组成与结构。在持续不断的城市人工干扰场中,植物生长严重受到限制,这就促使植物群落往往通过调节自身的生活型组成以适应不同强度的干扰。如乔木稀少或遭到严重破坏的山体,其下层植被可以享有较为充足的光照、风等物理资源,在一定程度上改变了植物的发育生长周期,这可能导致了不同干扰强度下生活型之间的差异。然而,不同干扰强度山体植物生活型及物种

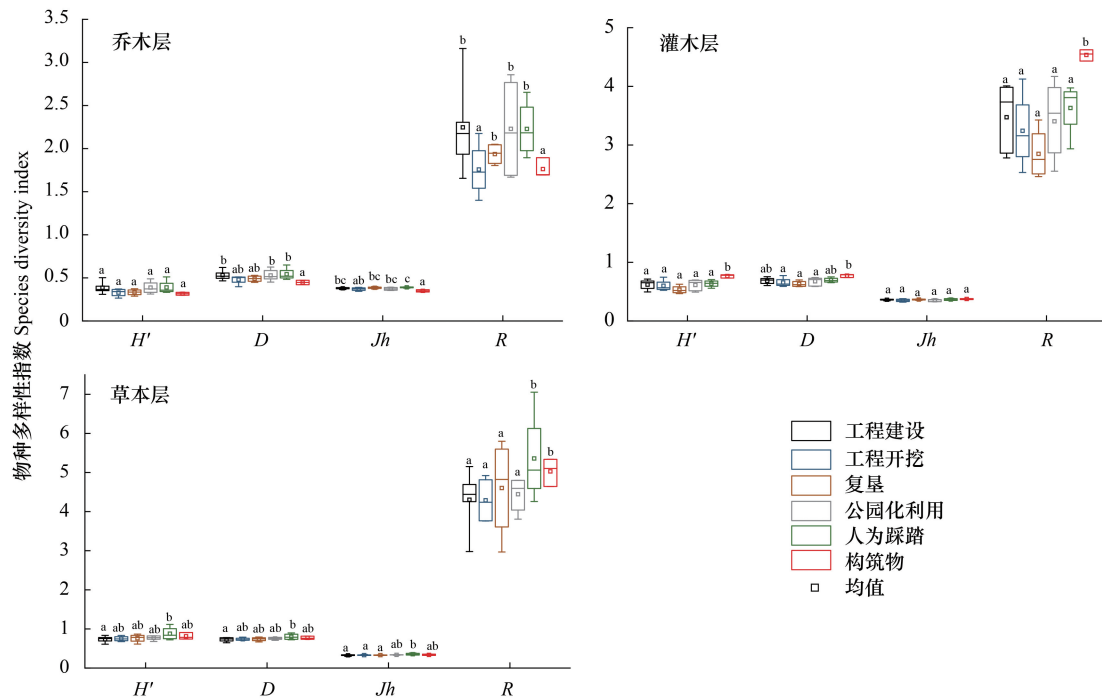


图 11 不同人为干扰方式下城市遗存山体不同层次物种多样性

Fig.11 Species diversity of different levels of URMs under different artificial disturbance ways

组成总体上也呈现出一定的相似性,这也反映了人为干扰强度并不是完全影响喀斯特城市遗存山体植物生活型组成的主要原因,还与周边城市基质、生境条件以及土壤、光照、地形、气候等因素有关^[40-42]。

大量自然环境背景下的研究表明,物种多样性在中等干扰强度下达到峰值,提出了中度干扰假说的预测(IDH),例如 Biswas 和 Abd El-Wahab 等的研究^[43-44]与本研究结果不完全一致。本研究发现,不同人为干扰强度下乔木层和灌木层的物种多样性符合 IDH 假设,而草本层则完全相反。通常来讲,群落的高度和植物盖度大小通常意味着植物对光的可利用程度,随干扰程度加大,重度干扰下冠层封闭程度降低,林下植被能更好地吸收光照水分等资源,这增加了草本植物物种多样性。中度干扰能促进不同生物地理亲和性物种共存^[19],在本研究中,乔木层和灌木层多样性均在中等干扰最高,这是因为喀斯特山体自身生态环境较为脆弱,山体岩石裸露和石漠化现象较为严重,而适度的干扰改变了植物群落的环境条件,群落环境的变化又致使群落物种组成的变化,从而使得不同生活、生态特性的物种在不同群落环境中成为优势种。然而,在高度受干扰的生境中,具有相似抗干扰特性的物种可以共存,因为大多数物种属于相似的功能群^[18],因此这导致了不同层次物种多样性的差异,其次,在干扰后群落的恢复过程中,恢复中期物种丰富度最大。

4.2 不同人为干扰方式对城市遗存山体植被群落特征的影响

黔中地区作为典型的生态环境脆弱区,长期的人为活动导致该区域原始植被遭到破坏,石漠化加剧^[45]。有研究表明该地区不同绿地类型、不同方位等条件下植物群落物种多样性差异明显^[26,34]。汤娜等研究表明中度以下程度公园化利用对植物群落物种多样性具有一定的促进作用,重度公园化利用存在明显的负面影响^[21]。在本研究中,复垦干扰下植被覆盖度(FVC)和净初级生产力(NPP)均为最高。这可能是因为喀斯特地区山体内部土壤裸露和岩石裸露的现象较为突出,复垦在一定程度上可以改变山体内部的生境条件,如人为选择适应能力强的果树和林木栽培,阻止了山体内部的水土流失,而局部的农田种植,如施肥、杀虫、除草等活动促进了群落的演替,土壤翻动使其养分充分发挥,原有恶劣的生境条件有所改善,植被生长发育状况较好,提高了植被的总体覆盖度,因此植被的净初级生产力也同步较高。与之相反,公园化利用具有较低的FVC值,且NPP值最低,这可能是因为几座公园化利用山体类型皆为中小型山体,其中重度公园化利用山体植被

遭到了建筑物和大量硬质活动场地的严重破坏,因而山体整体植被覆盖度较低,加之频繁的游憩活动,垃圾废弃物等干扰,致使植被净初级生产力被降低。因此,建议今后城市遗存山体的开发利用应结合山体特征和人为干扰历史,选择合适的人为干扰方式,尽可能提高植被的总体覆盖度,以促进植被生产力和生态效益的最大化。

研究表明不同的人为干扰方式对城市遗存山体植物群落物种组成具有不同程度的影响,人为踩踏丰富了植物群落的物种组成,增加了外来植物数量;而复垦和工程开挖在一定程度上极大的降低了植物群落的物种组成,以及减少了外来植物的物种数。这可能是因为不同的人为干扰方式的干扰强度不同(如前述表 4 和图 4),如工程开挖集中于重度人为干扰强度下,边坡挖方、浇筑混凝土等形式对山体进行大面积的工程性破坏,混凝土护坡及沙石废弃物裸地,不利于植物的萌发和生长。人为踩踏均为轻中度干扰强度,对原生植被破坏较小,加之人类活动过程中可能会不同程度携带外来植物物种的繁殖体,促进了外来植物的繁殖发育,丰富了乡土和外来植物物种组成^[46-48]。

在本研究中不同人为干扰方式下不同生活型层次物种多样性指数的变化趋势完全不一致,这表明人为干扰方式对城市遗存山体植物群落多样性的影响是错综复杂的,不能仅考虑干扰与否,还要考虑干扰方式的强度^[15]。把人为干扰强度和干扰方式综合起来研究更能说明人为干扰对植被特征的影响。因此,建议今后城市空间规划、城市遗存山体的开发利用与其植物多样性保护应协调进行,对城市遗存山体的植被可以进行适当的人为扰动来增加不同层次植被群落的物种多样性,但要尽量控制对城市遗存山体植被物种组成和多样性破坏严重的干扰方式。

5 结论

城市是人为主导的社会-经济-自然复合生态系统,镶嵌于城市建成区内部的孤岛状城市遗存山体长期受到城市人工干扰场中各种类型和强度的干扰。本研究结果表明适度的人为干扰对城市遗存山体植物群落具有一定正向积极作用,可以丰富群落结构,提升物种多样性水平。这也验证了“中度干扰假说”在复杂的人工环境中也具有一定的适宜性。而在城市环境中干扰方式多样,其中工程建设、边坡开挖等干扰方式对城市遗存山体造成破坏性甚至毁灭性的负面影响,这些干扰在用地紧张的多山城市常有发生,因此需要从长远效益和生态优先思维下,权衡经济发展与生态建设之间的关系,尽可能控制高强度的人为干扰对城市遗存山体的破坏。踩踏和适度公园化利用对城市遗存山体植物群落的影响较小,且会促进群落正向发展,所以,在城市遗存山体生态斑块保护的前提下,适当地、科学合理地利用城市遗存山体生态资源,为城市居民开辟亲近自然、体验野趣的休憩空间,能够更好地发挥城市遗存山体资源的生态系统服务功能。本研究从现象层面分析了人为干扰对城市遗存山体植物群落的影响,并初步分析了其响应规律。但在机理机制层面,城市遗存山体植物群落对城市人工干扰场中的各种干扰如何响应,仍需深入研究。

参考文献(References):

- [1] Fernández I C, Wu J G, Simonetti J A. The urban matrix matters: quantifying the effects of surrounding urban vegetation on natural habitat remnants in Santiago de Chile. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 187: 181-190.
- [2] Pramanik S, Areendran G, Punia M, Sahoo S. Spatio-temporal pattern of urban eco-environmental quality of Indian megacities using geo-spatial techniques. *Geocarto International*, 2021, 37(17): 5067-5090.
- [3] Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, Reilly M K. A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS One*, 2011, 6(8): e23777.
- [4] Aronson M F J, La Sorte F A, Nilon C H, Katti M, Goddard M A, Lepczyk C A, Warren P S, Williams N S G, Cilliers S, Clarkson B, Dobbs C, Dolan R, Hedblom M, Klotz S, Kooijmans J L, Kühn I, MacGregor-Fors I, McDonnell M, Mörtberg U, Pyšek P, Siebert S, Sushinsky J, Werner P, Winter M. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281(1780): 20133330.
- [5] Sushinsky J R, Rhodes J R, Possingham H P, Gill T K, Fuller R A. How should we grow cities to minimize their biodiversity impacts? *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 401-410.

- [6] Guillen-Cruz G, Rodríguez-Sánchez A L, Fernández-Luqueño F, Flores-Rentería D. Influence of vegetation type on the ecosystem services provided by urban green areas in an arid zone of northern Mexico. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 62: 127135.
- [7] Brockerhoff E G, Barbaro L, Castagneyrol B, Forrester D I, Gardiner B, González-Olabarria J R, Lyver P O, Meurisse N, Oxbrough A, Taki H, Thompson I D, van der Plas F, Jactel H. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(13): 3005-3035.
- [8] Chen A L, Yao L, Sun R H, Chen L D. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? *Ecological Indicators*, 2014, 45: 424-433.
- [9] Brunbjerg A K, Hale J D, Bates A J, Fowler R E, Rosenfeld E J, Sadler J P. Can patterns of urban biodiversity be predicted using simple measures of green infrastructure? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 143-153.
- [10] Miller J R. Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(8): 430-434.
- [11] Walker J S, Grimm N B, Briggs J M, Gries C, Dugan L. Effects of urbanization on plant species diversity in central Arizona. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(9): 465-470.
- [12] 戚书玮, 陈奇伯, 杨波, 杨建光, 黎建强, 黄新会. 计划烧除对云南松林群落结构和物种多样性的影响研究. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2022, 41(4): 80-88.
- [13] 贾真真, 李苇洁, 田奥, 王加国. 贵州百里杜鹃风景区旅游干扰对杜鹃群落特征的影响. *生态学报*, 2021, 41(11): 4641-4649.
- [14] 李威, 周梅, 赵鹏武, 田金龙, 王梓璇, 赵威, 高岩. 大兴安岭东麓火烧迹地恢复初期植被特征. *东北林业大学学报*, 2020, 48(1): 51-55.
- [15] 徐海鹏, 于成, 舒朝成, 金少红, 庞晓攀, 郭正刚. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物群落多样性和稳定性的影响. *草业学报*, 2019, 28(5): 90-99.
- [16] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 朱仁斌, 杨晓梅, 赵新宇, 苏纪帅. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2013, 33(9): 2856-2866.
- [17] 裴广廷, 孙建飞, 贺同鑫, 胡宝清. 长期人为干扰对桂西北喀斯特草地土壤微生物多样性及群落结构的影响. *植物生态学报*, 2021, 45(1): 74-84.
- [18] Biswas S R, Mallik A U. Disturbance effects on species diversity and functional diversity in riparian and upland plant communities. *Ecology*, 2010, 91(1): 28-35.
- [19] Stevens J T, Safford H D, Harrison S, Latimer A M. Forest disturbance accelerates thermophilization of understory plant communities. *Journal of Ecology*, 2015, 103(5): 1253-1263.
- [20] 范小晨, 代存芳, 陆欣鑫, 范亚文. 金湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(16): 5726-5738.
- [21] 汤娜, 王志泰. 黔中城市喀斯特山体遗存植物群落公园化利用响应. *生态学报*, 2021, 41(8): 3033-3052.
- [22] 王国宏, 王小平, 张维康, 李贺, 杜连海, 吴记贵. 北京市自然保护区植物群落对干扰胁迫的抵抗力分析. *生物多样性*, 2013, 21(2): 153-162.
- [23] 黄光宇. 山地城市空间结构的生态学思考. *城市规划*, 2005, (1): 57-63.
- [24] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
- [25] Chen X T, Wang Z T, Bao Y. Cool island effects of urban remnant natural mountains for cooling communities: a case study of Guiyang, China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 102983.
- [26] Kong N, Wang Z T. Response of plant diversity of urban remnant mountains to surrounding urban spatial morphology: a case study in Guiyang of Guizhou Province, China. *Urban Ecosystems*, 2022, 25(2): 437-452.
- [27] 邢龙, 王志泰, 涂燕茹. 黔中喀斯特城市遗存自然山体景观格局时空演变——以安顺市为例. *生态学报*, 2021, 41(4): 1291-1302.
- [28] 尹锴, 田亦陈, 袁超, 张飞飞, 苑全治, 花利忠. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释. *国土资源遥感*, 2015, 27(1): 133-139.
- [29] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [30] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [31] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [32] 邢龙. 岩溶地区城市山体自然遗存特征及其生态服务功能综合绩效评价——以贵阳市为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [33] Kuipers K J J, May R F, Graae B J, Verones F. Reviewing the potential for including habitat fragmentation to improve life cycle impact assessments for land use impacts on biodiversity. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(12): 2206-2219.
- [34] 向杏信, 黄宗胜, 王志泰. 喀斯特多山城市空间形态结构与植物群落物种多样性的耦合关系——以安顺市为例. *生态学报*, 2021, 41(2): 575-587.

- [35] 储金龙, 王佩, 顾康康, 汪勇政. 山水型城市生态安全格局构建与建设用地开发策略. 生态学报, 2016, 36(23): 7804-7813.
- [36] 周寒冰, 王志泰, 王志杰, 包玉. 喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应——以贵阳市中心城区为例. 水土保持研究, 2021, 28(6): 337-347.
- [37] Zeng M L, Bao Y, Wang Z T, Huang Z S, Chen X T, Wei W F, Lin X, Li Q. Patch three-dimensional effect for plant species diversity of urban remnant mountain in multi-mountain city. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108996.
- [38] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 苏维词, 曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [39] Herben T, Klimešová J, Chytrý M. Effects of disturbance frequency and severity on plant traits: an assessment across a temperate flora. *Functional Ecology*, 2018, 32(3): 799-808.
- [40] 毛志宏, 朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(8): 2695-2701.
- [41] 汤娜, 王志泰, 包玉, 陈信同, 马星宇, 韦光富. 城市基质对城市遗存自然山体植物群落物种多样性的影响——以贵阳为例. 生态学报, 2022, 42(15): 1-15.
- [42] 尹锴, 崔胜辉, 石龙宇, 吝涛, 郭青海, 吕静. 人为干扰对城市森林灌草层植物多样性的影响——以厦门市为例. 生态学报, 2009, 29(2): 563-572.
- [43] Biswas S R, Mallik A U. Species diversity and functional diversity relationship varies with disturbance intensity. *Ecosphere*, 2011, 2(4): 52.
- [44] Abd El-Wahab R H. Plant assemblage and diversity variation with human disturbances in coastal habitats of the western Arabian Gulf. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 787-798.
- [45] 李睿, 王志泰, 包玉. 快速城市化背景下黔中多山城市扩展模式及景观格局动态——以安顺市为例. 水土保持研究, 2020, 27(4): 376-384, 391-391.
- [46] 王应刚, 梁炜, 张婷, 苏尚军, 祝振华, 刘斌. 晋中盆地不同土地利用类型的植物多样性. 生态学杂志, 2015, 34(11): 2995-3001.
- [47] 蒋裕良, 蒙涛, 许为斌, 谭卫宁, 张强, 刘演. 喀斯特山顶区域濒危裸子植物群落特征及其地形关联. 生态学报, 2021, 41(5): 1868-1877.
- [48] Gao J J, Carmel Y. Can the intermediate disturbance hypothesis explain grazing-diversity relations at a global scale? *Oikos*, 2020, 129(4): 493-502.