

基于冗余分析的城市森林林下层植物多样性预测

尹 锴¹, 崔胜辉^{1,*}, 赵千钧^{1,2}, 花利忠¹, 石龙宇¹, 吝 涛¹

(1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要:以 4 类多样性指数作为衡量城市森林林下层植物多样性差异的定量指标, 并同时记录对应样方尺度的环境变量特征。以期应用冗余分析(RDA)手段提取城市森林林下层植物多样性的干扰控制因子, 从而进一步揭示主要环境变量对城市森林林下层植物多样性变异的贡献率。RDA 分析结果表明枯落物盖度、距林缘距离、小路面积和垃圾数 4 变量为能够显著解释林下叶层植物多样性变化的最小变量组合, 解释信息量百分比达 61%, 10 变量共同解释的信息量为 72.1%。在 RDA 分析的基础上, 对 10 环境变量组合与植物多样性特征进行双重筛选逐步回归, 发现草本密度与海拔、坡度、距林缘距离、枯落物盖度呈极显著相关; 草本层 Pielou 均匀度指数与海拔、坡度、郁闭度、枯落物盖度、岩石盖度呈极显著相关; 草本层 Simpson 多样性指数与坡度、枯落物盖度、距林缘距离、岩石盖度、伐桩数呈极显著相关; 灌木层 Pielou 均匀度指数则与海拔、郁闭度、小路面积、岩石盖度呈极显著相关。

关键词:城市森林; 植物多样性; 冗余分析; 双重筛选逐步回归; 林下叶层

文章编号: 1000-0933(2009)11-6085-10 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Understory diversity prediction of urban forest based on the redundancy analysis (RDA)

YIN Kai¹, CUI Sheng-Hui^{1,*}, ZHAO Qian-Jun^{1,2}, HUA Li-Zhong¹, SHI Long-Yu¹, LIN Tao¹

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6085 ~ 6094.

Abstract: In this paper, four diversity indexes were considered as quantitative indicators of understory for urban forest, while the features of environment variables were recorded at the corresponding quadrat scale. By applying the redundancy analysis (RDA) the control factors that affect understory diversity in urban forest were extracted and the contributions to understory diversity were further disclosed. RDA results showed that litter cover, distance to the forest edge, road area and garbage four-variables were the minimum variables combination which can significantly explain the understory plant diversity, with 61% information explanation. The 10 variables could explain 72.1% of all information. Based on the RDA, 10 environmental variables and understory features were performed duplicate bolting stepwise regression. The result showed that herb density and altitude, slope, distance to forest edge, litter cover were significantly related; Pielou evenness of herb significantly related with the altitude, slope, canopy cover, litter cover and rock cover; Simpson diversity of herb significantly related with slope, litter cover, distance to forest edge, rock cover and stake; Pielou evenness of shrub significantly related with altitude, canopy cover, road area and rock cover.

Key Words: urban forest; plant diversity; redundancy analysis; duplicate bolting stepwise regression; understory

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-422); 国家自然科学基金资助项目(40701059); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助项目

收稿日期: 2009-04-10; 修订日期: 2009-06-15

致谢:本研究得到厦门大学生命科学学院李振基教授及森林生态系统与植物多样性课题组对样地选择的指导以及对植物标本鉴定的大力支持。同时感谢中国科学院城市环境研究所唐立娜老师对写作的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shcui@iue.ac.cn

城市区域的生物多样性及相关保护对策研究一直以来都为生态学家所关注^[1~4]。城市化也被普遍认为是改变自然生态环境、引起大多数当地物种快速减少和灭绝的最主要的驱动力之一^[5]。物种多样性的丧失,导致残存于城市建成区的城市森林生态系统稳定性降低,脆弱不堪。尽管城市居民每天都生活在城市森林当中,然而人们对于身边植物多样性的干扰机制以及变化规律却知之甚少,国内也尚未见到城市森林植物多样性预测的相关报道。研究城市森林林下层植物多样性与环境因子的关系,尤其是人为干扰环境因子对于城市森林斑块内部植物多样性的影响,有助于深入理解城市区域植物多样性的人为干扰机制,并为今后城市区域的生物多样性保护提供理论依据。

自 20 世纪 70 年代以来,排序方法就被用来将群落信息的方差分解到各正交轴,进而作出排序图或与潜在的解释变量相联系^[6]。随着统计软件的大量问世,多元统计方法中的主成分分析、相关分析、因子分析、回归分析等在诸多科研领域中已经取得了广泛应用,典范排序法也被生态学家迅速应用到物种-环境关系的分析中^[7,8]。然而相较其他排序方法(如 PCA、CCA、DCA 等)而言,国外环境、生态等领域对于 RDA 分析应用较少,主要集中在影响生物^[9]、植被^[10]、景观^[11,12]分布的关键环境及社会经济因子的甄选。而国内应用更是仅见董旭辉等对冗余分析在简化湖泊沉积指标体系中的应用^[13]和李燕等的太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响^[14]两例研究。作为众多直接梯度分析方法的一种,RDA 能从统计学的角度来有效评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系^[8]。RDA 分析方法能有效地对多环境指标进行统计检验,并确定对林下叶层植物多样性变化具最大解释能力的最小变量组。经过一系列转换、筛选后,能够有效地简化变量的个数,为研究者进一步简化分析创造条件^[9]。双重筛选逐步回归方法立足解决多对多的回归问题,是对 RDA 分析手段的有益补充。

本文以城市建成区内城市森林较多分布的厦门市为例,集中选取相思纯林下灌草层植被作为研究对象,运用 RDA 分析法筛选对于林下层植物多样性格局具有显著影响的环境变量,探测环境变量变化对于城市森林林下层植物多样性的影响。在此基础上进行双重筛选逐步回归,以期在城市森林的植物多样性保护提供数据支撑,并为 RDA 分析与双重筛选逐步回归方法在植被生态领域的应用开展有益尝试。

1 研究区自然概况

厦门市是闽东南部的沿海城市,地理坐标东经 117°53′~118°25′,北纬 24°25′~24°54′,东与我国的台湾省隔海相望,是我国改革开放的窗口和海峡两岸交流的前沿。属亚热带海洋性季风气候,年均气温为 20.7℃,年降雨量 1143.5mm,相对湿度 76%,雨热同期,热量充足。地貌以低丘、台地等类型为主,地势自西北向东南倾斜,并向南延伸入海,地形复杂多样,丘陵山地面积占全市面积的三分之二。土壤为砖红性红壤,母岩多为粗晶花岗岩,地带性植被类型为亚热带季风常绿阔叶林。厦门特区经过 27a 的发展,完成了从传统农业地区向高度城市化区域的转变,高速城市化进程引发土地利用和覆盖的深刻改变。目前,厦门市区内早已不存在原始森林,岛内现存大片城市森林多为建国初期厦门人民绿化荒山海岛所营造的马尾松、台湾相思等人工林,集中分布在中北部的仙岳山、狐尾山以及南部万石山、东平山等山体。现有植被中,乔木以台湾相思树(*Acacia richii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)等为主,灌木有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、冬青(*Ilex purpurea*)、石斑木(*Raphiolepis indica*)等,地被植物有芒萁骨(*Picranoptens dichotoma*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)等。

2 数据采集与研究方法

2.1 野外调查与取样

在厦门市万石山、天马山等残留的城市森林生境上,运用典型样地法选取 35 块相思纯林作为典型样地,以分布在其下的灌草群落作为研究对象。在此基础上采用系统取样法,从城市森林边缘向森林内部,每隔 10m 设置一个面积 10m×10m 乔木样方,在乔木样方内,设置 1 个 5m×5m 的灌木样方,每个灌木样方内设 1 个 1m×1m 的草本样方。乔木样方内调查记录乔木的种名、树高、胸径、冠幅等。灌木草本样方运用等级分类法,目测所有物种的盖度,记录其种名、个体数目,并测量高度及丛径。同时,记录下样方内的诸如海拔、坡度、

郁闭度、岩石盖度、灌木层盖度、草本层高度、草本层盖度、枯落物层厚度、枯落物层盖度、土壤容重、土壤 pH 值等 11 个常规林业调查的微环境变量,并根据当地城市森林的实际情况,记录下样方距离森林边缘的水平距离、样方内小路的总面积、小路数、火烧迹地数、丢弃垃圾数、瓦砾数、伐桩数、墓地数、人为采挖数以及人为采挖面积等 10 个人为干扰环境变量,共计 21 个环境变量。

2.2 数据处理

本研究中所涉及的植物多样性计算均基于重要值方法^[15],选取反映物种丰富度的 Partrick 丰富度指数、物种分布的 Simpson 多样性指数、基于信息论的 Shannon 指数以及偏重物种分布均匀程度的 Pielou 均匀度指数 4 个指数作为灌木层和草本层的多样性测度指标,同时统计灌木层和草本层密度,共计 10 个指标作为植物多样性特征矩阵,运算软件采用 DPS3.01 版本^[16]。植物多样性特征与环境变量之间的关系研究采用 RDA 分析方法,所有原始数据均进行 Log 转换,变量的显著性经过 499 次的 Monte Carlo 检验^[6],软件选用 CANOCO4.5 版本^[8]。回归分析采用双重筛选逐步回归法,软件版本为 DPS3.01^[16]。

3 结果

3.1 林下叶层植被的多样性特征

对厦门城市森林林下层植物群落进行物种数量统计,结果发现城区植物 54 种,其中乔木 10 种,灌木 15 种,草本 19 种,藤本 10 种;郊区共记录到植物 46 种,其中乔木 9 种,灌木 16 种,草本 15 种,藤本 6 种。就物种而言,厦门市及郊区相思林下的常见的植物种类有台湾相思(*Abrus precatorius*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、朴树(*Celtis sinensis Pers*)、潺槁树(*Litsea glutinosa*)、山牡荊(*Vitex negundo*)、马樱丹(*Lantana camara*)、芒萁(*Dicranopteris*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、荇草(*Arthraxon hispidus*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)、西番莲(*Passiflora edulis*)等。其中,在草本层中占据优势的物种分别为荇草、豨薟(*Siegesbeckia orientalis*)、拉拉藤(*Galium aparine*)、酸酱草(*Oxalis corniculata*)等,灌木层主要物种有马樱丹、朴树、山牡荊、水杨梅(*Myrica rubra*)和五节芒等。具体各个样方的林下叶层植物多样性等植被数量特征见表 1。

表 1 林下叶层的植被数量特征
Table 1 Quantity characteristics of understory

样方 Plot	草本层多样性 Herb diversity				灌木层多样性 Shrub diversity				草本密度 Herb density	灌木密度 Shrub density
	Partrick	Simpson	Shannon	Pielou	Partrick	Simpson	Shannon	Pielou		
1	5	0.502	1.3807	0.5946	3	0.5609	1.3022	0.8216	163	1.08
2	4	0.4888	1.2591	0.6296	4	0.543	1.4906	0.7453	173	0.4
3	6	0.3839	1.0742	0.4155	4	0.678	1.6668	0.8334	338	0.8
4	9	0.2979	1.0336	0.3261	5	0.769	2.1898	0.9431	529	1.08
5	5	0.2854	0.8256	0.3556	4	0.4481	1.2464	0.6232	777	1.68
6	5	0.5513	1.5163	0.6531	2	0.4539	0.9257	0.9257	105	0.24
7	6	0.5961	1.6619	0.6429	7	0.7853	2.3399	0.8335	95	0.76
8	2	0.491	0.9799	0.9799	8	0.8261	2.6994	0.8998	12	0.92
9	3	0.0988	0.3407	0.2149	11	0.8889	3.2529	0.9403	121	1.72
10	3	0.2874	0.7835	0.4944	11	0.8814	3.2231	0.9317	106	1.56
11	8	0.4727	1.4424	0.4808	8	0.8569	2.8424	0.9475	367	0.56
12	4	0.5474	1.3648	0.6824	7	0.7718	2.4294	0.8654	121	1.96
13	3	0.2389	0.6887	0.4345	5	0.6668	1.8878	0.813	129	0.92
14	6	0.4409	1.4234	0.5506	11	0.8612	3.0606	0.8847	113	1.36
15	2	0.1551	0.4154	0.4154	4	0.4385	1.2441	0.6221	47	2.28
16	5	0.2652	0.8766	0.3775	6	0.711	2.0891	0.8082	384	1.52
17	6	0.7038	2.0306	0.7855	8	0.8165	2.6182	0.8727	42	1.12
18	4	0.6075	1.6237	0.8118	8	0.8423	2.7743	0.9248	50	1.8
19	3	0.4771	1.1951	0.754	7	0.818	2.5821	0.9198	35	1.56
20	5	0.6389	1.6945	0.7298	7	0.8139	2.5825	0.9199	45	1.12

续表

样方 Plot	草本层多样性 Herb diversity				灌木层多样性 Shrub diversity				草本密度 Herb density	灌木密度 Shrub density
	Patrick	Simpson	Shannon	Pielou	Patrick	Simpson	Shannon	Pielou		
21	3	0.2118	0.6197	0.391	6	0.8264	2.5156	0.9732	33	1.24
22	3	0.5592	1.2839	0.81	4	0.6421	1.6585	0.8293	7	2.04
23	0	0	0	0	4	0.6986	1.8468	0.9234	0	1.88
24	6	0.154	0.5776	0.2235	12	0.6886	2.2256	0.6208	145	6.96
25	3	0.1238	0.3908	0.2466	5	0.6227	1.7873	0.7698	87	3.48
26	4	0.4687	1.3004	0.6502	5	0.7257	2.0206	0.8702	36	1.24
27	2	0.016	0.0671	0.0671	8	0.7849	2.4725	0.8242	206	1.88
28	2	0.4596	0.9341	0.9341	7	0.7625	2.3651	0.8425	5	2.12
29	3	0.6032	1.4129	0.8914	6	0.7338	1.9873	0.7688	27	2.28
30	4	0.1007	0.374	0.187	6	0.7168	2.0598	0.7969	68	1.64
31	6	0.2837	0.9621	0.3722	4	0.7234	1.8973	0.9486	180	1.04
32	4	0.7085	1.8568	0.9284	9	0.8432	2.7497	0.8674	11	2.08
33	4	0.5869	1.5155	0.7578	7	0.7962	2.4787	0.8829	18	2.48
34	3	0.6313	1.5	0.9464	8	0.8599	2.8204	0.9401	4	1.16
35	3	0.3918	1.019	0.6429	4	0.751	1.9812	0.9906	11	0.64

3.2 基于 RDA 分析的微环境变量提取

RDA 分析的前瞻性选择是必要步骤,将会有助于建立一个更为简单的模型(拥有较少的可解释环境变量)^[8]。对于厦门城市森林样方尺度的 21 个环境变量进行量化统计,在进行微环境变量的 RDA 分析之前,选择保留的环境变量数为两者(环境变量数减去一,植被变量数)之间的最小值。表 1 所示即为微环境变量在 RDA 分析中的前瞻选择特征,此前,所有数据均经过 Log 转化,经检验能够保证所有 10 个变量的膨胀系数均小于 20。在此 10 个变量当中特征值大于 0.05 有 4 个变量,分别为枯落物盖度、距林缘距离、小路面积和垃圾数,且均达到 0.05 显著性水平(表 2)。

表 2 微环境变量在 RDA 分析中的前瞻选择特征

Table 2 Marginal and conditional effects of environment variables obtained from the forward selection of RDA

变量名 Variable name	均值 Mean	标准差 Stand. dev.	膨胀系数 Inflation factor	特征值 LambdaA	P	F
海拔 Altitude	48.63	16.56	2.02	0.02	0.272	1.29
坡度 Slope	13.99	6.76	1.19	0.03	0.056	2.73
郁闭度 Canopy cover	79.91	15.07	1.28	0.01	0.278	1.31
枯落物盖度 Litter cover	65.54	31.08	1.46	0.36	0.002	18.16
距林缘距离 Distance to forest edge	30.00	15.90	1.43	0.06	0.020	4.30
小路面积 Road area	0.84	0.86	2.48	0.14	0.002	9.52
垃圾数 Rubbish number	1.57	1.98	1.29	0.05	0.030	3.52
墓地数 Grave number	0.17	0.61	1.51	0.02	0.202	1.54
岩石盖度 Rock cover	2.57	6.67	1.54	0.01	0.356	1.13
伐桩数 Stake number	0.60	1.22	1.23	0.02	0.240	1.29

RDA 分析结果显示,林下叶层植物多样性信息总变异中的 72.1% 能够为以上 10 个变量所解释。其中,第一轴解释了 65.7% 的变异信息,第二轴解释了约 3.3% 的变异信息(图 1)。由 RDA 排序图可知,草本层密度与小路面积呈正相关,表明人们在城市森林内游憩时,更倾向于选择周围草本茂密的地方,这点已经得到部分证实^[17]。城市森林的郁闭度与草本层密度呈正相关,而与草本层多样性呈负相关,反映出越是森林茂密、缺乏光照的地段,其林下草本层植物多样性越为单一,草本层中的优势种即为喜阴性植物所占据。灌木层多样性与伐桩数、枯落物盖度呈正相关,表明一定程度的疏林管理措施能够增加灌木层的多样性,而灌木层多样性的增加反过来有助于枯落物的累积。灌木层密度与距林缘距离、坡度呈正相关,表明距直接人为干扰因素越远,灌木层长势越好。

为了更加直观地反映各植物多样性特征与环境变量的关系,特将4个对于植被信息有显著影响的环境变量提出,做出各植物多样性特征的RDA等值线图。含4个变量的RDA分析结果显示,林下叶层植物多样性信息总变异中的61%能够为以上4个变量所解释,仅比10个变量所解释的信息量少11.1%。

在垂直于草本层密度等值线的方向上,随着枯落物层盖度及距林缘距离的增加,草本层密度逐渐减小。随着垃圾数与小路面积的增加,草本层密度逐渐增大(图2)。

在垂直于草本层 Partrick 丰富度指数等值线的方向上,随着距林缘距离、枯落物盖度的增加,草本层 Partrick 丰富度指数逐渐减小。随着小路面积的增加,草本层 Partrick 丰富度指数逐渐增大(图3)。

在垂直于草本层 Shannon 多样性指数等值线的方向上,随着枯落物盖度的增加,草本层 Shannon 多样性指数逐渐增大。而小路面积、距林缘距离环境变量的箭头指向与草本层 Shannon 多样性指数的等值线基本平行,反映出草本层 Shannon 多样性指数对于这些变量的变化不敏感(图4)。

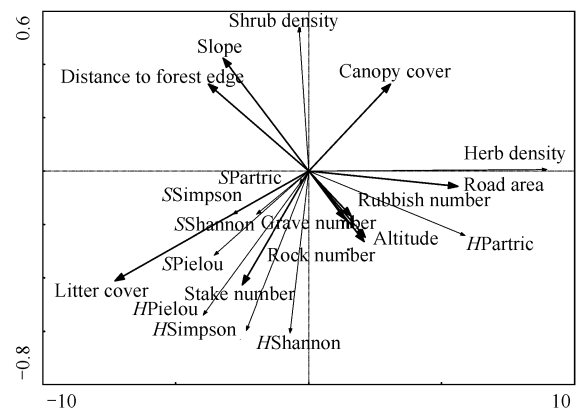


图1 植被信息与环境解释变量的RDA排序图

Fig. 1 The ordination diagram of RDA with vegetation and explanatory variables

* :Herb Partrick index (HPartric), Herb Simpson index (HSimpson), Herb Shannon index (HShannon), Herb Pielou index (HPielou)分别代表草本层的 Partrick 丰富度指数, Simpson 多样性指数, Shannon 指数及 Pielou 均匀度指数, Shrub Partric index (SPartric), Shrub Simpson index (SSimpson), Shrub Shannon index (SShannon), Shrub Pielou index (SPielou)分别对应灌木层上述指数; Herb density, Shrub density 分别表示草本层和灌木层密度, Altitude, Slope, Canopy cover, Litter cover, Distance to forest edge, Road area, Rubbish number, Grave number, Rock cover, Stake number 分别表示海拔、坡度、郁闭度、枯落物盖度、距林缘距离、小路面积、垃圾数、墓地数、岩石盖度和伐桩数等环境变量

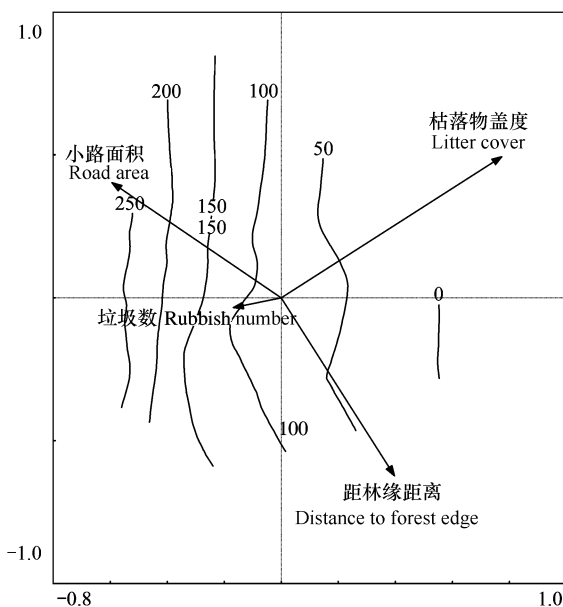


图2 草本层密度等值线图

Fig. 2 The density isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

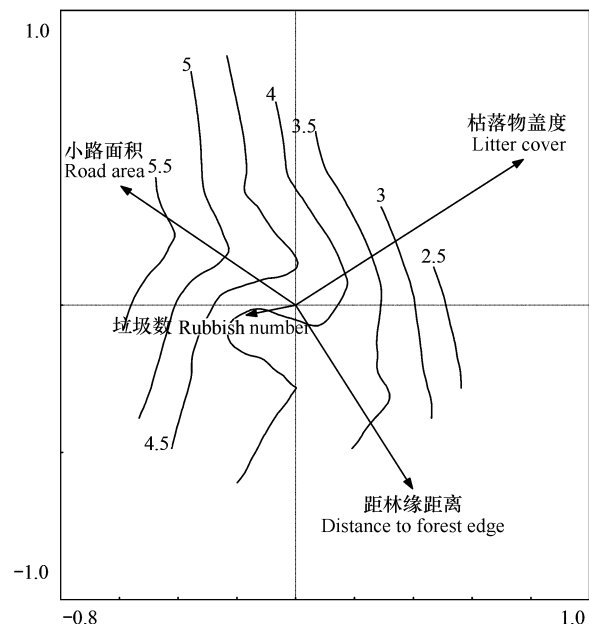


图3 草本层 Partrick 丰富度等值线图

Fig. 3 The Partrick isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

在垂直于草本层 Shannon 多样性指数等值线的方向上,随着枯落物盖度的增加,草本层 Shannon 多样性指数逐渐增大。而小路面积、距林缘距离环境变量的箭头指向与草本层 Shannon 多样性指数的等值线基本平行,反映出草本层 Shannon 多样性指数对于这些变量的变化不敏感(图5)。

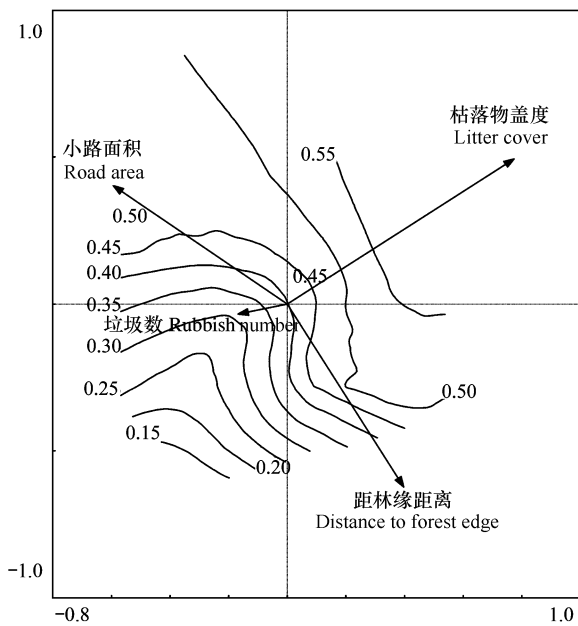


图4 草本层 Simpson 多样性等值线图

Fig. 4 The Simpson isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

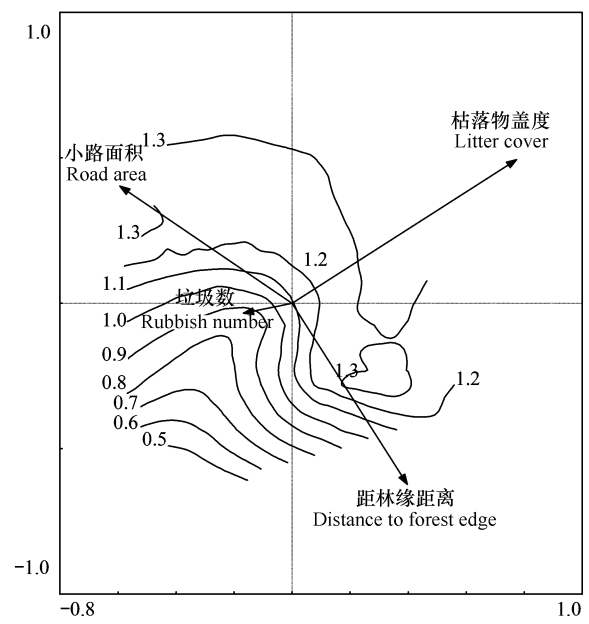


图5 草本层 Shannon 多样性等值线图

Fig. 5 The Shannon isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

在垂直于草本层 Pielou 均匀度指数等值线的方向上,随着垃圾数的增加,草本层 Pielou 均匀度指数逐渐减小。随着枯落物盖度的增加,草本层 Pielou 均匀度指数逐渐增大。而距林缘距离、小路环境变量的箭头指向与草本层 Pielou 均匀度指数的等值线基本平行,反映出 Pielou 均匀度指数对于这些变量的变化不敏感(图 6)。

在垂直于灌木层密度等值线的方向上,随着枯落物盖度、距林缘距离的增加,灌木层密度逐渐增加。随着小路的增加,灌木层密度逐渐减少(图 7)。

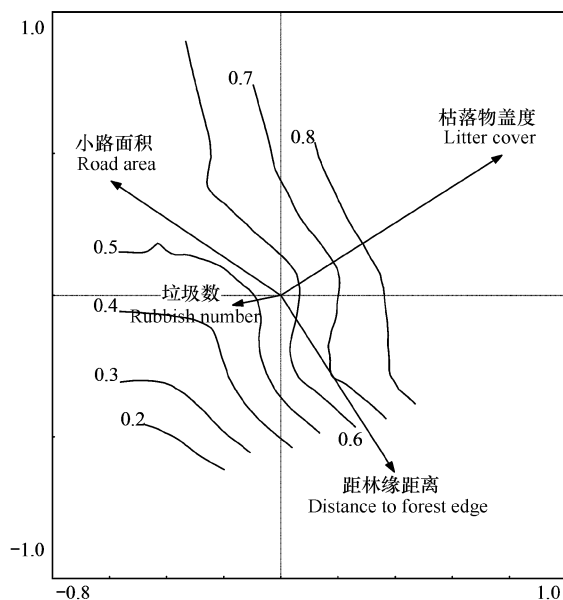


图6 草本层 Pielou 多样性等值线图

Fig. 6 The Pielou isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

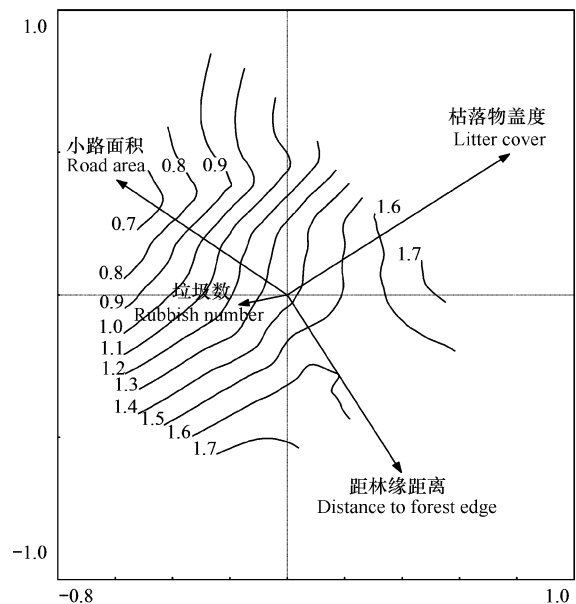


图7 灌木层密度等值线图

Fig. 7 The density isolines of shrub, plotted in the RDA ordination diagram

灌木层 Patrick 丰富度的等值线在距林缘距离箭头经过的区域形成近圆形,显示并无环境变量与之呈现单调的相关关系。灌木层 Patrick 丰富度由外到内逐渐增加,反映出一定程度的干扰(如距林缘距离因子)与能够提高其丰富度,但是这种变化显示出先升后降的非单调变化趋势(图 8)。

灌木层 Simpson 多样性的等值线在坐标原点附近形成呈半椭圆,外围呈半封闭的弧状排列,灌木层 Simpson 多样性值由外到内逐渐增加,反映出 4 个环境变量与之呈现负相关关系(图 9)。

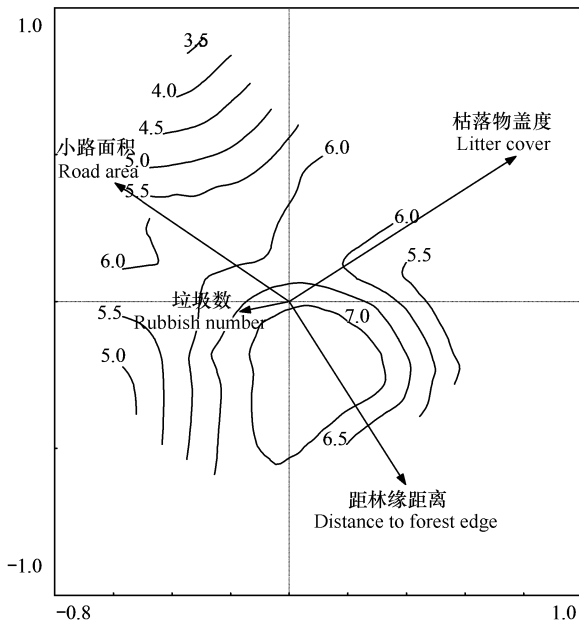


图 8 灌木层 Patrick 丰富度等值线图

Fig. 8 The Patrick isolines of shrub, plotted in the RDA ordination diagram

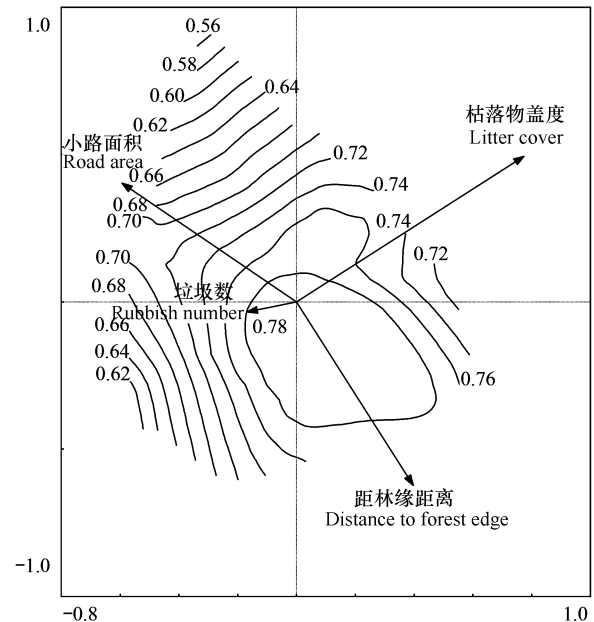


图 9 灌木层 Simpson 多样性等值线图

Fig. 9 The Simpson isolines of shrub plotted in the RDA ordination diagram

4 个环境变量出发的原点依然落在灌木层 Shannon 多样性的等值线形成的闭合近椭圆形内,且灌木层 Shannon 多样性值由外到内逐渐增加,反映出一定程度的人为干扰能够提高其 Shannon 多样性,但是这种变化为非单调的(图 10)。

灌木层 Pielou 均匀度的等值线形成的半封闭圆弧距林缘距离环境变量基本平行,反映出灌木层 Pielou 均匀度对于该环境变量的变化不敏感;沿着枯落物盖度、垃圾数和小路面积环境变量的方向,灌木层 Pielou 均匀度由内到外逐渐降低,反映出上述 3 个环境变量与之呈负相关关系(图 11)。

4.3 基于双重筛选逐步回归的植物多样性预测

在考察多组自变量对多组因变量的影响时,由于其中某些自变量只对一部分因变量有影响,而另外一些自变量则对其它因变量的取值区间有明显作用。因此,我们有必要引入双重筛选逐步回归这一方法,分组建立回归方程。

本研究中,分别以草本层密度、灌木层密度、草本层

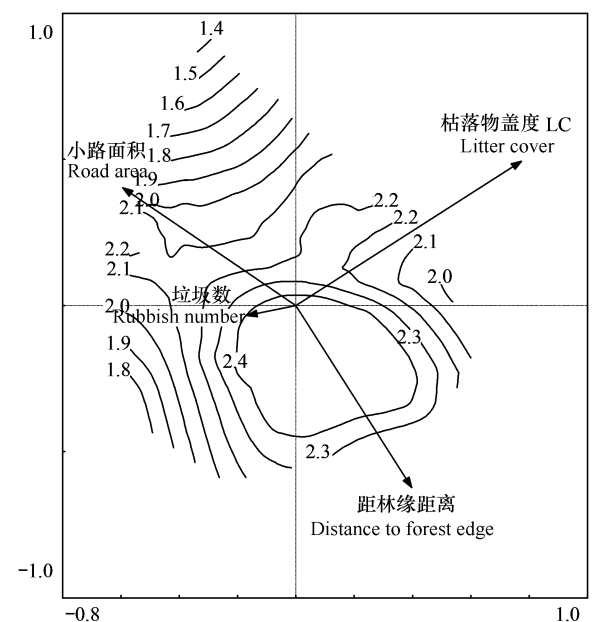


图 10 灌木层 Shannon 多样性等值线图

Fig. 10 The Shannon isolines of shrub, plotted in the RDA ordination diagram

多样性指数以及灌木层多样性指数为因变量,以表 3 中 10 个环境变量作为自变量,进行双重筛选逐步回归。在临界值 $F_x = 1.58$, $F_y = 1.81$ 的条件下,可建立如下回归方程(组),如下所示:

以上方程中的因变量 Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9, Y10 依次分别为草本层 Partrick, Simpson, Shannon, Pielou 多样性指数,灌木层 Partrick, Simpson, Shannon, Pielou 多样性指数,以及草本密度和灌木密度。X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10 分别依次代表表 2 中所示的海拔、坡度、郁闭度、枯落物盖度、距林缘距离、小路面积、垃圾数、墓地数、岩石盖度、伐桩数 10 个环境变量。上述 6 个方程组中(表 3 ~ 表 8), Y9 草本密度与海拔、坡度、距林缘距离、枯落物盖度呈极显著相关; Y4 草本层 Pielou 均匀度指数与海拔、坡度、郁闭度、枯落物盖度、岩石盖度呈极显著相关; Y2 草本层 Simpson 多样性指数与坡度、枯落物盖度、距林缘距离、岩石盖度、伐桩数呈极显著相关; Y8 灌木层 Pielou 均匀度指数则与海拔、郁闭度、小路面积、岩石盖度呈极显著相关。

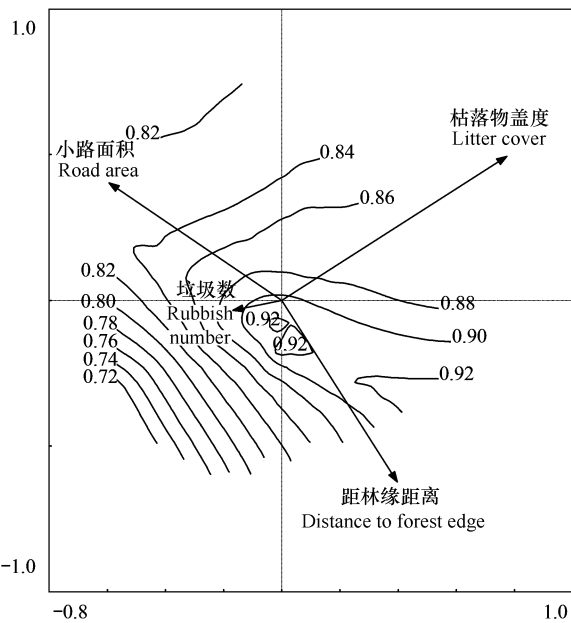


图 11 灌木层 Pielou 多样性等值线图
Fig. 11 The Pielou isolines of herb, plotted in the RDA ordination diagram

表 3 第 1 方程组
Table 3 The first equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable					a	R	P	S
	X1	X2	X4	X5					
Y1	0.0230	-0.0408	-0.0221	-0.0375		6.1360	0.5777	0.0136	1.5739
Y3	0.0001	-0.0237	0.0075	-0.0090		1.1770	0.5572	0.0214	0.4486
Y9	4.3792	-3.8688	-3.1681	-0.9422		208.2205	0.7286	0.0001	121.6431

表 4 第 2 方程组
Table 4 The second equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable					a	R	P	S
	X1	X2	X3	X4	X9				
Y4	-0.0025	-0.0129	-0.0002	0.0062	0.0089	0.4422	0.7321	0.0003	0.1932
Y10	-0.0188	0.0474	0.0220	-0.0094	-0.0512	0.8555	0.6002	0.0185	0.9897

表 5 第 3 方程组
Table 5 The third equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable					a	R	P	S
	X2	X4	X5	X9	X10				
Y2	-0.0113	0.0037	-0.0024	0.0067	0.0302	0.3482	0.6842	0.0018	0.1595
Y7	-0.0110	0.0007	0.0114	0.0362	0.1570	1.7870	0.5413	0.0611	0.5264

表 6 第 4 方程组
Table 6 The fourth equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable		a	R	P	S
	X8	X10				
Y5	-1.3720	0.5639	6.3254	0.4447	0.0294	2.2646

表 7 第 5 方程组
Table 7 The fifth equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable				<i>a</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
	<i>X</i> 5	<i>X</i> 6	<i>X</i> 9	<i>X</i> 10				
<i>Y</i>	0.0019	-0.0385	0.0061	0.0240	0.6783	0.5458	0.0271	0.1096

表 8 第 6 方程组
Table 8 The sixth equations

因变量 Dependent	自变量 Independent variable				<i>a</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
	<i>X</i> 1	<i>X</i> 3	<i>X</i> 6	<i>X</i> 9				
<i>Y</i> 8	0.0017	-0.0024	-0.0467	0.0032	0.9938	0.6224	0.0044	0.0791

5 讨论

微生境的改变往往造成群落植物多样性及其种类组成发生变化。由于各种干扰因素间的协同性、叠加性和连锁性,给确定主要影响因素及开展定量研究造成诸多不便。加之人为干扰的复杂性使得相应的多样性研究也变得十分困难,因此在野外条件下选择独立研究某种干扰对植物多样性的影响很难实现^[18]。而 RDA 则直接将感兴趣的环境变量作为约束条件考虑到排序分析中,从而大幅度消减环境变量的规模,有“约束下的排序方法”之称^[6]。本研究在 RDA 分析的基础上,运用双重筛选逐步回归方法构建城市森林林下层的植物多样性预测模型,有效消除自变量之间的共线性干扰,选出因变量与自变量之间同时具有显著关系的方程组,最大限度地保留了环境预测信息。在植被生态学研究,将 RDA 分析与双重筛选逐步回归方法有机结合不失为一种有益尝试。

本研究 RDA 等值线排序图表明,样方内小路面积与草本层植物多样性呈负相关,表明人为踩踏降低了草本层的植物多样性,同时也反映出伐桩等因素破坏景观,人们不愿在此环境下游憩。尽管人为踩踏能够直接造成植被覆盖率降低^[19],但是本研究中土壤容重并非影响植物多样性格局的显著因素。草本层多样性与伐桩数呈正相关,这是由于一定程度的干扰(包括营林措施)有助于草本层植物多样性的增加^[17]。

RDA 分析结果显示,厦门城市森林林下层植物多样性信息总变异中的 72.1% 能够为以上 10 个变量所解释,而 4 个与植物多样性信息显著相关的环境变量能够有效解释总信息量的 61%,比 10 个变量所解释信息量少 11.1%。国内学者董旭辉等对太白湖沉积柱的所有指标进行冗余分析后发现,仅包含松花粉的百分含量、沉积物磷浓度、频率磁化率及有机碳含量等 4 个变量的最小沉积指标的组合就能显著解释水环境变化,与全部变量组合解释的信息量相比,仅损失了 6.1% 的信息^[13]。李燕等在研究下垫面因素对面源污染物输出强度的影响时,也发现不同小流域中这 3 个因素对流域水质影响的贡献率不同^[14]。这说明 RDA 分析在运用到不同研究区域、研究对象(水环境、植被群落)时,其对于信息的解释能力存在差异。

然而可以肯定的是,RDA 分析最大优势在于,其不仅能独立保持各个变量对植物群落变化的贡献率,而且能够最大限度地精简环境变量个数。在能够显著解释厦门城市森林林下层植物多样性变化的最小变量组合当中,4 变量中有 3 个(距林缘距离、小路面积和垃圾数)与人类活动有关。Codefroid 等在研究比利时布鲁塞尔的城市未开垦荒地的植被分布时,考虑了包括人造基质和微环境气候变量在内的 19 种环境变量,结果显示城市荒地植物组成受土壤营养物质、土壤 pH 值、土壤湿度和光照等因子影响较大^[20]。而 Kentaro 对于日本京都的研究表明,蕨类植物多样性取决于城市森林的斑块大小以及距山地森林距离^[21]。这也证明了任何不当的人类活动都极易造成城市森林微环境的波动,从而导致植物多样性格局的改变,进而危及城市森林生态系统服务功能的正常发挥。因此在残存的城市森林斑块内,必须严格控制人类活动的频度与强度,对其游憩资源进行合理的开发与利用,切实保障林下层植物多样性格局以及整个生态系统的完整性。

References:

[1] Kowarik I. The role of alien species in urban flora and vegetation. In: Pysek P, ed. Plant Invasions. General Aspects and Special Problems.

- Amsterdam (Netherlands): SPB Academic, 1995. 85—103.
- [2] Codefroid S, Monbaliu D, Koedam N. The role of soil and microclimatic variables in the distribution patterns of urban wasteland flora in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80: 45—55.
- [3] Turner K, Lefler L, Freedman B. Plant communities of selected urbanized areas of Halifax, Nova Scotia, Canada. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71: 191—206.
- [4] Guirado M, Pino J, Roda F. Understorey plant species richness and composition in metropolitan forest archipelagos: effects of forest size, adjacent land use and distance to the edge. *Global Ecology and Biogeography*, 2006, 15: 50—62.
- [5] Huste A, Boulinier T. Determinants of local extinction and turnover rates in urban bird communities. *Ecological Applications*, 2007, 17: 168—180.
- [6] Pierre L. Study Beta diversity: ecological variation partitioning by multiple regression and canonical analysis. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(5): 976—981.
- [7] Ter Braak C J F. CANOCO—a FORTRAN program for Canonical community Ordination by [partial][detrended][canonical] Correspondence Analysis, Principal Component Analysis and Redundancy Analysis (version 2.1). Wageningen: Agricultural Mathematics Group, Ministry of Agriculture and Fisheries, 1988.
- [8] Ter Braak C J F, Smilauer F P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows. User's guide: software for Canonical Ordination (version 4.5). New York: Microcomputer power, Ithaca, 2002.
- [9] Kristie N, Sven U, Robert H. Is light the limiting factor for the distribution of benthic symbiont bearing foraminifera on the Great Barrier Reef? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 363: 48—57.
- [10] Elke H, Rainer W, Annette O. Statistical modeling of land-cover changes based on key socio-economic indicators. *Ecological Economics*, 2007, 62: 496—507.
- [11] Karyne B, Andrée B, Gérald D. Abandoned farmlands as components of rural landscapes: An analysis of perceptions and representations. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83: 228—244.
- [12] Peter Z, Valdinir P T. GIS and ordination techniques for evaluation of environmental impacts in informal settlements: A case study from Cuiaba? central Brazil. *Applied Geography*, 2008, 28: 1—15.
- [13] Dong X H, Yang X D, Liu E F, Wang R. Application of redundancy analysis in predigesting sedimentary proxies for paleolimnological research: A case study of Taibai Lake. *Geographical Research*, 2008, 29(5): 1319—1324.
- [14] Li Y, Li H P. Influence of landscape characteristics on non-point source pollutant output in Taihu upper-river basin. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1319—1324.
- [15] Song Y C. *Vegetation Ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
- [16] Tang Q Y, Feng M G. *Practical statistical analysis and computer processing platform*. Beijing: China Agricultural Press, 1997.
- [17] Yin K, Cui S H, Shi L Y, Lin T, Guo Q H, Lü J. Human-induced disturbance on the understory plant diversity of urban forest — A case study of Xiamen. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 563—572.
- [18] Mao Z H, Zhu J J, Tan H. Effects of disturbances on plant species diversity of secondary forest in montane regions of eastern Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1357—1364.
- [19] Bhuj D R, Ohsawa M. Effects of nature trails on ground vegetation and understory colonization of a patchy remnant forest in an urban domain. *Biological Conservation*, 1998, 85: 123—135.
- [20] Kentaro M, Hisayuki M, Yukihiro M. Factors influencing species diversity of ferns and fern allies in fragmented forest patches in the Kyoto city area. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 70: 221—229.
- [21] Codefroid S, Monbaliu D, Koedam N. The role of soil and microclimatic variables in the distribution patterns of urban wasteland flora in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80: 45—55.

参考文献:

- [6] Pierre L. β 多样性的研究: 应用多元回归和典范分析研究生态方差的分解. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 976—981.
- [13] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰, 王荣. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例. *地理研究*, 2007, 26(3): 477—484.
- [14] 李燕, 李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响. *环境科学*, 2008, 29(5): 1319—1324.
- [15] 宋永昌. *植被生态学*. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [16] 唐启义, 冯明光. *实用统计分析及其计算机处理平台*. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [17] 尹锴, 崔胜辉, 石龙宇, 吝清, 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.
- [18] 毛志宏, 朱教君, 谭辉. 干扰对辽东山区次生林植物多样性的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1357—1364.