

南京市公园绿地苔藓植物多样性及特点

芦建国, 景 蕾

(南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 公园是城市绿地系统的重要组成部分, 也是植物最丰富的场所之一。苔藓植物作为公园植物多样性的组成部分, 却常常因其矮小、景观特色不明晰而为人们所忽视, 因此苔藓植物的相关研究也往往滞后于其他植物。通过对南京市 11 个公园绿地苔藓植物的调查, 共记录苔藓植物 20 科 34 属 51 种, 其种类多集中于丛藓科 Pottiaceae, 真藓科 Bryaceae 和青藓科 Brachytheciaceae, 常见种类有扭口藓 *Barbula unguiculata*, 立碗藓 *Physcomitrium sphaericum*, 细叶小羽藓 *Haplocladium microphyllum*, 卵叶青藓 *Brachythecium rutabulum*, 鳞叶藓 *Taxiphyllum taxirameum* 和狭叶小羽藓 *Haplocladium angustifolium* 等。公园内苔藓种类一般为 3~30 种, 以丛集型苔藓为主, 物种组成相似性较低, 群落差异性较显著。应用典范对应分析法(CCA), 对 11 个公园样点的主要苔藓植物盖度与环境因子的关系进行研究, 环境因子与前 2 个排序轴的相关性系数表明: 影响地面苔藓植物分布的环境因子分别为湿度、人为干扰、郁闭度以及与主干道距离, 其中人为干扰和湿度对苔藓植物分布的影响最显著。图 2 表 5 参 35

关键词: 植物学; 苔藓多样性; 公园; 生活型; 典范对应分析

中图分类号: Q949.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)03-0486-08

Biodiversity and characteristics of ground bryophytes in 11 parks of Nanjing

LU Jianguo, JING Lei

(College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The city park is an important component of urban green space system and one of the most abundant areas of plants. As a part of the park landscape, bryophyte is easily ignored on account of its small size, and thus the research on bryophyte is lagging behind the research on other plants. Based on the field work, 51 bryophyte species in 34 genera and 20 families were reported from 11 parks in Nanjing. Among them, 35.29 per cent of the species belonged to Pottiaceae, Bryaceae and Brachytheciaceae. The most common species were *Barbula unguiculata*, *Physcomitrium sphaericum*, *Haplocladium microphyllum*, *Brachythecium rutabulu*, *Taxiphyllum taxirameum* and *Haplocladium angustifolium*. The number of bryophyte species in the 11 parks varied from 3 to 30 and turfs were the main life form of bryophytes. The similarity of bryophyte species composition among different parks was low, which suggested the significant community diversity among these areas. Canonical correspondence analysis (CCA) was used to evaluate the relationships between the various bryophyte species and environmental factors in the 11 sample sites. According to the correlation coefficients of the environmental variables with the first two axes, the environmental variables that influenced the distribution of the main species were humidity, human disturbance, canopy density and distance to main roads. Human disturbance and humidity had the most significant impacts on the distribution of ground bryophytes. [Ch, 2 fig. 5 tab. 35 ref.]

Key words: botany; diversity of bryophyte; park; life form; canonical correspondence analysis (CCA)

收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-10-11

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A063)

作者简介: 芦建国, 教授, 从事园林植物应用研究。E-mail: 961203385@qq.com

苔藓植物是植物景观的重要组成部分，但由于其株型矮小、结构简单，常常被忽视，这也使得它在植物学、景观生态学和风景园林学等方面的研究严重滞后于其他高等植物。然而事实上，苔藓植物的生态价值、应用价值和艺术价值极为丰富。就生态价值来说，它具有固碳^[1-2]、蓄水保湿^[3-5]、促进土壤结皮^[6-8]、监测环境^[9-10]等多种作用；就应用价值而言，苔藓植物因其保水能力强而常用作花卉保鲜材料，部分苔藓植物还具药用^[11]价值；就艺术价值而言，苔藓植物可用作园林布置、盆景装饰，亦可成为插花材料。城市是人口聚居之地，环境变化与市民健康息息相关，而苔藓植物因其结构特征对环境变化极为敏感^[12]，最能指示城市环境变化。国外学者对此进行了较多的研究^[13-15]，且研究结果也都证明苔藓植物的环境指示作用较其他植物更为明显。中国学者也对青岛^[16]、上海^[17]、重庆^[18]、泰州^[19]等城市的苔藓植物进行了相关研究。张银龙等^[20]指出苔藓植物对环境污染非常敏感，以细叶小羽藓 *Haplocladium microphyllum* 为最，王壮等^[21]通过实验发现：附生苔藓对重金属离子具有较强的吸附能力。总之，苔藓植物作为先锋植物，是整个生态系统中不可或缺的一部分。因此，研究苔藓植物的多样性对于保护苔藓种质资源以及维持生态平衡意义重大。然而，随着人们对自然资源的过度开发、随意浪费，苔藓植物的生存正在遭受严重威胁。公园是城市绿地系统中最具代表性且物种最丰富的地域，研究南京市公园苔藓多样性不仅可以为保护苔藓植物资源奠定基础，而且可以评估南京地区公园的环境质量。

1 研究区域概况

南京位于江苏省西南部(31°14'~32°37'N，118°22'~119°14'E)，整体地形复杂，有高山丘陵、平原溪谷、滨湖江河等多种地形地貌。就气候而言，该地区属亚热带季风气候，终年雨量充沛，年平均降水量为 1 200.0 mm，四季分明，年平均温度为 15.4 ℃。全市辖玄武、秦淮、建邺、鼓楼、雨花台、栖霞、江宁、浦口、六合、溧水、高淳等 11 个区，共有 83 个街道、17 个镇，城市绿化覆盖率为 45%^[22]。

2 研究方法

2.1 野外调查

在玄武区、鼓楼区、建邺区等 8 个行政区各筛选 1~3 个公园，于 2017 年 9~11 月对 11 个样点进行苔藓调查(表 1)。设置 10 m × 10 m 的样地 64 个，在各样地中随机设置 20 cm × 20 cm 样方 4~9 个，随后按顺序采集、编号苔藓标本，详细记录郁闭度、湿度、人为干扰以及与主干道距离 4 个环境因子，用网格法测定苔藓植物(盖度占 50%以上)的面积。苔藓标本借助实验室显微镜辨识并确定其生活型^[23]。标本鉴定和定名依据参考文献[24~26]。环境因子测定方法：郁闭度采用目测法；湿度用温湿度仪测定；与主干道距离用谷歌地球(Google Earth)测定。人为干扰因素考虑人为踩踏、破坏、城市开发建设等因素，分为 5 级：罕见干扰、较少干扰、中等干扰、较多干扰和经常干扰，分别赋值 1，2，3，4，5。

2.2 数据处理

2.2.1 苔藓植物多样性指数 Patrick 丰富度指数(D)：D=S。其中：S 为样地内种数。Shannon 多样性指

表 1 南京市调查样点情况

Table 1 Survey of investigated sites in Nanjing City							
序号	样点	所属区	地理位置	郁闭度/%	湿度/%	与主干道距离/m	人为干扰
1	古林公园	鼓楼区	32°04'N, 118°45'E	46	68	160	4
2	白鹭洲公园	秦淮区	32°01'N, 118°47'E	60	80	200	4
3	七桥瓮生态公园	秦淮区	32°00'N, 118°50'E	53	63	120	2
4	白马石刻公园	玄武区	32°03'N, 118°48'E	40	65	430	3
5	莫愁湖公园	建邺区	32°02'N, 118°45'E	36	71	410	5
6	青奥森林公园	建邺区	31°59'N, 118°41'E	18	57	200	3
7	珍珠泉公园	浦口区	32°07'N, 118°39'E	70	70	150	4
8	羊山公园	栖霞区	32°06'N, 118°56'E	10	51	500	3
9	九乡河生态公园	栖霞区	32°07'N, 118°56'E	0	43	80	1
10	平山森林公园	六合区	32°27'N, 118°49'E	65	65	170	2
11	九龙湖公园	江宁区	31°55'N, 118°48'E	10	53	120	2

说明：人为干扰分为 5 级：罕见干扰、较少干扰、中等干扰、较多干扰和经常干扰，分别赋值 1，2，3，4，5

数(H')^[27]: $H'=-\sum_{i=1}^s\left(\frac{N_i}{N}\ln\frac{N_i}{N}\right)$ 。其中: N 为全部种的总盖度; N_i 为每个种的个体盖度。Pielou 均匀性指数(E)^[28]: $E=\frac{H'}{\ln(S)}$ 。

2.2.2 Sørensen 相似性系数^[29] $S'=2C/(A+B)$ 。其中: A 为公园 A 的物种数, B 为公园 B 的物种数, C 为公园 A 和 B 的共有物种数。

2.2.3 典范对应分析 利用 CANOCO 4.5 中的典范对应分析方法(CCA)对地面苔藓植物分布与环境因子间的关系进行数据处理与分析。

3 结果与分析

3.1 苔藓植物种类组成

由表 2 统计知: 11 个公园内共有苔类植物 2 科 2 属 2 种, 藓类植物 18 科 32 属 49 种, 总计 20 科 34 属 51 种。种类多集中于丛藓科 Pottiaceae (4 属 5 种)、真藓科 Bryaceae (4 属 7 种) 和青藓科 Brachytheciaceae (3 属 6 种), 占总属数的 32.4% 和总种数的 35.3%。这 3 个科的种类对环境的适应性强, 在公园中最为常见。在多数公园(≥ 7 个)均有分布的苔藓种类有 6 种, 分别是扭口藓 *Barbula unguiculata*, 立碗藓 *Physcomitrium sphaericum*, 细叶小羽藓, 狭叶小羽藓 *Haplocladium angustifolium*, 卵叶青藓 *Brachythecium rutabulum* 和鳞叶藓 *Taxiphyllum taxirameum*。

表 2 11 个公园苔藓植物名录
Table 2 List of bryophytes in 11 parks of Nanjing

序号	种名	在样点中的分布											生活型
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	紫背苔 <i>Plagiochasma rupestre</i>					Δ					Δ		平铺型
2	地钱 <i>Marchantia polymorpha</i>							Δ					平铺型
3	中华无轴藓 <i>Archidium ochioense</i>			Δ					Δ				丛集型
4	丛毛藓 <i>Pleuridium subulatum</i>	Δ					Δ	Δ			Δ	Δ	丛集型
5	黄牛毛藓 <i>Ditrichum pallidum</i>										Δ		丛集型
6	大曲背藓 <i>Oncophorus virens</i>						Δ	Δ		Δ			丛集型
7	长蒴藓 <i>Trematodon logicollis</i>		Δ			Δ		Δ			Δ		丛集型
8	曲尾藓 <i>Dicranum scoparium</i>					Δ			Δ				丛集型
9	粗肋凤尾藓 <i>Fissidens crassinervis</i>		Δ								Δ		倾斜型
10	拟小凤尾藓 <i>Fissidens tosaensis</i>							Δ					倾斜型
11	小凤尾藓 <i>Fissidens bryoides</i>	Δ		Δ				Δ			Δ		倾斜型
12	南京凤尾藓 <i>Fissidens adelphinus</i>				Δ			Δ			Δ		倾斜型
13	卷叶湿地藓 <i>Hyophila involuta</i>						Δ				Δ		丛集型
14	小石藓 <i>Weissia controversa</i>			Δ			Δ						丛集型
15	扭口藓 <i>Barbula unguiculata</i>	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	丛集型
16	小扭口藓 <i>Barbula indica</i>			Δ				Δ					丛集型
17	反扭藓 <i>Timmia anomala</i>	Δ	Δ				Δ	Δ			Δ		丛集型
18	葫芦藓 <i>Funaria hygrometrica</i>			Δ			Δ				Δ		丛集型
19	立碗藓 <i>Physcomitrium sphaericum</i>	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	丛集型
20	日本立碗藓 <i>Physcomitrium japonicum</i>	Δ						Δ					丛集型
21	拟长蒴丝瓜藓 <i>Pohlia longicollis</i>	Δ					Δ	Δ			Δ	Δ	丛集型
22	细叶真藓 <i>Bryum capillare</i>		Δ				Δ	Δ			Δ		丛集型
23	柔叶真藓 <i>Bryum cellulare</i>					Δ							丛集型
24	比拉真藓 <i>Bryum billardieri</i>							Δ					丛集型
25	真藓 <i>Bryum argenteum</i>	Δ			Δ		Δ	Δ			Δ		丛集型
26	金黄银藓 <i>Anomobryum auratum</i>							Δ					丛集型
27	短月藓 <i>Brachytenium nepalense</i>							Δ					丛集型

表 2 (续)
Table 2 Continued

序号	种名	在样点中的分布											生活型
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
28	圆叶匍灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	Δ					Δ						树状型
29	全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i>										Δ		树状型
30	尖叶匍灯藓 <i>Plagiomnium acutum</i>	Δ			Δ			Δ			Δ		树状型
31	细叶泽藓 <i>Philonotis thuaitesii</i>		Δ			Δ							丛集型
32	钟帽藓 <i>Venturiella sinensis</i>	Δ			Δ	Δ					Δ		丛集型
33	拟附干藓 <i>Schwetschkeopsis fabronia</i>	Δ											交织型
34	细叶小羽藓 <i>Haplocladium microphyllum</i>	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		交织型
35	狭叶小羽藓 <i>Haplocladium angustifolium</i>	Δ	Δ	Δ			Δ		Δ		Δ	Δ	交织型
36	齿叶麻羽藓 <i>Claopodium prionophyllum</i>		Δ			Δ						Δ	交织型
37	锦藓 <i>Sematophyllum subpinnatum</i>							Δ					交织型
38	匍枝青藓 <i>Brachythecium procumbens</i>	Δ		Δ					Δ		Δ		交织型
39	卵叶青藓 <i>Brachythecium rutabulum</i>	Δ			Δ	Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	交织型
40	羽枝青藓 <i>Brachythecium plumosum</i>	Δ		Δ		Δ					Δ	Δ	交织型
41	斜枝青藓 <i>Brachythecium campylothallum</i>			Δ									交织型
42	卵叶长喙藓 <i>Rhynchostegium ovalifolium</i>							Δ					交织型
43	密叶美喙藓 <i>Eurhynchium savatieri</i>							Δ					交织型
44	长柄绢藓 <i>Entodon macropodus</i>	Δ											平铺型
45	深绿绢藓 <i>Entodon luridus</i>	Δ						Δ					平铺型
46	细绢藓 <i>Entodon giraldii</i>			Δ				Δ					平铺型
47	绢藓 <i>Entodon cladorrhizans</i>			Δ				Δ			Δ		平铺型
48	弯叶毛锦藓 <i>Pylaisiadelpha tenuirostris</i>	Δ		Δ			Δ						交织型
49	鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ		交织型
50	软枝绿锯藓 <i>Duthiella flaccida</i>				Δ			Δ	Δ		Δ		交织型
51	硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i>							Δ					丛集型

说明：1. 古林公园；2. 白鹭洲公园；3. 七桥翁生态公园；4. 白马石刻公园；5. 莫愁湖公园；6. 青奥森林公园；7. 珍珠泉公园；8. 羊山公园；9. 九乡河生态公园；10. 平山森林公园；11. 九龙湖公园

3.2 苔藓植物多样性分析

由图 1 可知：各样点苔藓种类介于 3~30 种，Shannon 指数为 0.30~2.66，Pielou 指数为 0.27~0.78，说明苔藓植物在各公园中的盖度分布较不均匀。生物多样性较高($D \geq 20$, $H' \geq 1.50$)的公园有 3 个，分别是古林公园、珍珠泉公园和平山森林公园，占总调查公园数的 27.3%。种类数介于 10~19 种的公园有 4 个，为白鹭洲公园、七桥翁生态公园、莫愁湖公园和青奥森林公园。白马石刻公园、羊山公园、九乡河生态公园和九龙湖公园的多样性指数普遍较低($D < 10$, $H' \leq 1.08$)。在所调查的 11 个公园中，珍珠泉公园的多样性水平最高，而九乡河生态公园的多样性水平最低。原因可能是珍珠泉公园自然条件优良，植被覆盖率较高，为苔藓植物的生存提供了必要的荫蔽和湿度条件，而九乡河生态公园植被覆盖率极低，太阳直射的高温低湿影响了苔藓的生长甚至造成死亡。

3.3 苔藓植物相似性分析

由苔藓群落相似性系数表(表 3)可知：11 个公园苔藓群落相似性系数普遍较低。相似性系数大于 0.5 的公园仅有 11 组，占 20.0%；17 组公园相似性系数介于 0~0.3，占 30.9%；27 组公园相似性系数介

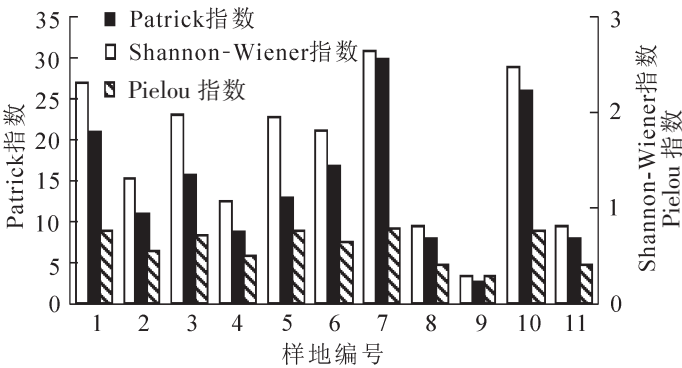


图 1 11 个公园的苔藓植物多样性
Figure 1 Diversity of mosses in 11 parks

于 0.3~0.5，占 49.1%。其中古林公园和平山森林公园相似性最高，为 0.64；九乡河生态公园和平山森林公园相似性最低，仅有 0.14。

表 3 11 个公园苔藓群落相似性系数

Table 3 Similarity coefficient of bryophyte communities from 11 parks in Nanjing

公园编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.39									
3	0.44	0.32								
4	0.47	0.30	0.16							
5	0.41	0.52	0.36	0.45						
6	0.63	0.61	0.38	0.46	0.33					
7	0.51	0.52	0.31	0.41	0.28	0.47				
8	0.33	0.35	0.52	0.35	0.36	0.31	0.21			
9	0.17	0.31	0.22	0.17	0.25	0.20	0.18	0.33		
10	0.64	0.56	0.44	0.51	0.41	0.60	0.57	0.32	0.14	
11	0.48	0.44	0.26	0.24	0.48	0.48	0.26	0.24	0.18	0.41

说明：1. 古林公园；2. 白鹭洲公园；3. 七桥翁生态公园；4. 白马石刻公园；5. 莫愁湖公园；6. 青奥森林公园；7. 珍珠泉公园；8. 羊山公园；9. 九乡河生态公园；10. 平山森林公园；11. 九龙湖公园

3.4 生活型分析

南京市 11 个公园中苔藓生活型共有 5 种(表 2)，分别为平铺型、丛集型、倾斜型、树状型和交织型。其中平铺型有 6 种，占总种数的 11.8%，为绢藓科 Entodontaceae，地钱科 Marchantiaceae 和瘤冠苔科 Aytoniaceae 植物；丛集型有 24 种，占总种数的 47.1%，主要为真藓科 Bryaceae 和丛藓科 Potticaeae 植物；倾斜型有 4 种，全为凤尾藓科 Fissidentaceae 植物；树状型有 3 种，全为提灯藓科 Mniaceae 植物；交织型有 14 种，主要包括羽藓科 Thuidiaceae 和青藓科 Brachytheciaceae 等。

不同生活型的苔藓植物在各公园的分布情况详见表 4。63.0% 的公园中多分布丛集型苔藓种类，36.0% 的公园多分布交织型苔藓种类。羊山公园、九乡河生态公园和九龙湖公园的苔藓生活型全部为丛集型和交织型，七桥翁生态公园则无树状型苔藓种类分布。

表 4 不同生活型苔藓在南京市 11 个公园的百分比

Table 4 Percentages of different life form of bryophytes from 11 parks in Nanjing City

公园编号	平铺型	丛集型	倾斜型	树状型	交织型	公园编号	平铺型	丛集型	倾斜型	树状型	交织型
1	9.5	38.1	4.8	9.5	38.1	7	13.3	50.0	0.0	3.3	23.3
2	0.0	54.6	9.1	0.0	36.4	8	0.0	37.5	0.0	0.0	62.5
3	13.3	33.3	6.7	0.0	46.7	9	0.0	66.7	0.0	0.0	33.3
4	0.0	33.3	11.1	11.1	57.1	10	7.7	46.2	11.5	7.7	26.9
5	7.7	53.9	0.0	0.0	38.5	11	0.0	50.0	0.0	0.0	50.0
6	0.0	64.7	0.0	5.9	29.4						

说明：1. 古林公园；2. 白鹭洲公园；3. 七桥翁生态公园；4. 白马石刻公园；5. 莫愁湖公园；6. 青奥森林公园；7. 珍珠泉公园；8. 羊山公园；9. 九乡河生态公园；10. 平山森林公园；11. 九龙湖公园

3.5 地面苔藓群落与环境的关系

苔藓植物特殊的生理结构使得其对环境十分敏感。对 11 个公园样点中的 24 种常见地面苔藓植物及其盖度和样点的环境因子(表 5)进行典范对应分析(CCA)，得到物种与环境因子关系图(图 2)。第 1 排序轴特征值的蒙特卡洛检验的 $P=0.01(P<0.05)$ ，表明排序结果可信。

由表 5 可知：与 CCA 排序图第 1 轴关系最大的是人为干扰，为正相关 0.406 5，说明第 1 轴向左人为干扰有增强的趋势。湿度与第 2 轴关系最大，为正相关 0.668 4，其次是人为干扰，为正相关 0.601 5，说明第 2 轴向上有湿度增大和人为干扰增强的趋势。

不同的苔藓种类对各环境因子的需求也有所不同。图 2 反映了苔藓植物与环境因子之间的关系。沿第 2 排序轴(垂直)，由下至上，林冠郁闭度和湿度逐渐增大，人为干扰逐渐加强，与主干道距离逐渐减

小。齿叶麻羽藓 *Claopodium prionophyllum* (S₃₆) 和羽枝青藓 *Brachythecium plumosum* (S₄₀) 对人为干扰的耐受力强，多见于公园道路旁。反纽藓 *Timmiella anomala* (S₁₇) 喜湿生环境，在排序图上与其他种类相距较远，说明它对生境有明显的要求。在实地调查中也发现反纽藓多在湿度较高的环境中生长健壮。钟帽藓 *Venturiella sinensis* (S₃₂)，大曲背藓 *Oncophorus virens* (S₆) 分布与主干道较远，说明它们对交通带来的尾气污染敏感，对环境质量要求较高。细叶真藓 *Bryum capillare* (S₂₂)，拟长蒴丝瓜藓 *Pohlia longicollis* (S₂₁)，匍枝青藓 *Brachythecium procumbens* (S₃₈)，湿叶卷地藓 *Hyophila involuta* (S₁₃) 和扭口藓 (S₁₅) 可分布在与主干道较近的位置，对尾气污染耐受力较强，属于抗污染种类。

4 讨论

通过对南京 11 个公园野外调查及标本鉴定，苔藓植物共 20 科 34 属 51 种，其中苔类 2 种，藓类 49 种。与苏州^[30]、镇江^[31] 这些邻近城市相比，南京市公园苔藓种类丰富度较低。可能原因主要有两方面：一是所调研的公园大多为游赏公园，如古林公园、白鹭洲公园等，日常养护管理频繁，人流量大，踩踏频率高，影响了苔藓的生存；二是部分公园开敞空间过多，如九龙湖公园和羊山公园，高温低湿的微环境影响了苔藓的分布和生长。环境异质性可以提高苔藓植物多样性^[32]。就 Shannon 多样性指数来看，多数公园都在 1.2 以上，部分公园已经达到 2.0，说明多数公园的环境异质性较高。其中多样性指数最高的珍珠泉公园位于南京浦口区，园内植被覆盖率高，生境多样，与主干道距离较远，为苔藓植物创造了优良的生存环境。

由于苔藓植物的生存十分依赖环境湿度^[33]，因此苔藓群落的生活型可以反映出当地的环境条件。例如，丛集型苔藓多为耐旱种类，而树状型苔藓植物则多在湿度较高的地域分布^[34]。除此之外，苔藓植物的生活型还可以监测环境石漠化^[35]。从相似性系数来看，群落间差异较大，这可能与公园所在地区的地理环境以及各公园管理水平有关。苔藓植物的茎叶对环境污染敏感，所以通过苔藓植物在园林内的分布和生长状态可以大致判断环境状况。本研究发现：自然环境和人为干扰共同影响苔藓植物在公园中的分布；真藓科、青藓科和丛藓科的部分种类在污染严重的地区多有分布，属于抗污染能力强的种类，后期可以拓展研究它们对环境污染物尤其是汽车尾气的富集能力以及响应机理等；钟帽藓和大曲背藓多分布在离主干道较远地区，故可以作为指示道路交通频度的苔藓种类。

5 参考文献

[1] BISBEE K E, GOWER ST, NORMAN J M, *et al.* Environmental controls on ground cover species composition and productivity in a boreal black spruce forest [J]. *Oecologia*, 2001, **129**(2): 261 – 270.

[2] SUN Shouqin, LIU Tao, WU Yanhong, *et al.* Ground bryophytes regulate net soil carbon efflux: evidence from two subalpine ecosystems on the east edge of the Tibet Plateau [J]. *Plant Soil*, 2017, **417**(1/2): 1 – 13.

[3] 刘艳, 乔光军. 缙云山国家级自然保护区不同生境下苔藓植物持水能力研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学

表 5 环境变量与前 2 个排序轴的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of environmental variables with the first two axes of CCA

排序轴	郁闭度	湿度	与主干道距离	人为干扰
1	-0.075 9	-0.171 9	-0.046 9	0.406 5
2	0.515 9	0.668 4	-0.184 6	0.601 5

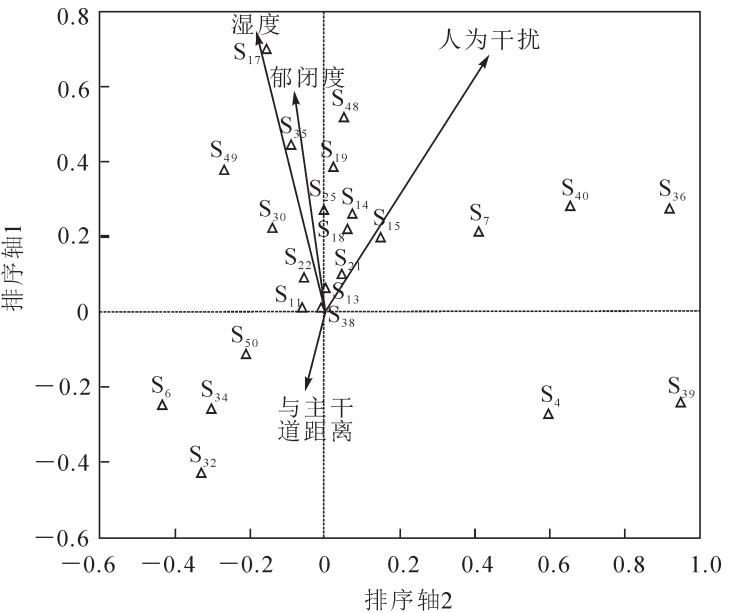


图 2 主要地面苔藓植物与环境的关系

Figure 2 Relationship of main ground bryophytes with their environmental factors

- 版), 2016, **33**(4): 150 – 153.
- LIU Yan, QIAO Guangjun. Water holding capacities of bryophytes under different habitat in Jinyunshan National Nature Reserve [J]. *J Chongqing Norm Univ Nat Sci*, 2016, **33**(4): 150 – 153.
- [4] 刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 等. 祁连山高寒灌丛苔藓持水性能[J]. 干旱区地理, 2014, **37**(4): 696 – 703.
- LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoyuan, *et al.* Water holding capacity of mosses under alpine shrubs in Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geogr*, 2014, **37**(4): 696 – 703.
- [5] DOJANI S, BÜDEL B, DEUTSCHEWITZ K, *et al.* Rapid succession of biological soil crusts after experimental disturbance in the Succulent Karoo, South Africa [J]. *Appl Soil Ecol*, 2011, **48**(3): 263 – 269.
- [6] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤结皮中苔藓植物的研究[J]. 西北植物学报, 2002, **22**(1): 18 – 23.
- ZHANG Yuanming, CAO Tong, PAN Borong. A study on bryophyte associated with formation of soil crust in south fringe of Gurbantunggut Desert in Xinjiang [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2002, **22**(1): 18 – 23.
- [7] ELDRIDGE D J, TOZER M E. Distribution and floristics of bryophytes in soil crusts in semi-arid and arid eastern Australia [J]. *Aust J Bot*, 1996, **44**(2): 223 – 247.
- [8] VITT D H. Patterns of growth of the drought tolerant moss, *acomitrium microcarpon*, over a three year period [J]. *Lindbergia*, 1989, **15**(6): 181 – 187.
- [9] 刘荣相, 王智慧, 张朝晖. 苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测[J]. 生态学报, 2011, **31**(6): 1558 – 1566.
- LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui. Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(6): 1558 – 1566.
- [10] 左思艺, 王智慧, 张朝晖. 张家湾子金矿苔藓植物物种多样性及其对重金属污染的监测[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(2): 412 – 417.
- ZUO Siyi, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui. Bryophyte species diversity and its indicative roles in monitoring heavy metals pollution in Zhangjiawanzi gold deposit area of Guizhou Province, Southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(2): 412 – 417.
- [11] 吴璐璐, 严雄梁, 季梦成. 浙江药用苔藓植物资源[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(1): 68 – 75.
- WU Lulu, YAN Xiongliang, JI Mengcheng. Medicinal byophytes in Zhejiang Province, China [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(1): 68 – 75.
- [12] 曹同, 王敏, 娄玉霞, 等. 监测环境污染的藓袋法技术及其应用[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2011, **40**(2): 213 – 220.
- CAO Tong, WANG Min, LOU Yuxia, *et al.* Echnique of moss-bag method for monitoring environmental pollution and its application [J]. *J Shanghai Norm Univ Nat Sci*, 2011, **40**(2): 213 – 220.
- [13] SABOVLJEVIC M, GRDOVIC S. Bryophyte diversity within urban areas: case study of the city of Belgrade (Serbia) [J]. *Int J Bot*, 2009, **5**(1): 85 – 92.
- [14] CHEN X H, YIM E Y, KANEKO Y, *et al.* Floristic diversity of bryophyte on various habitats [J]. *Bryol Res*, 2013, **10**: 333 – 340.
- [15] SKUDNIK M, SABOVLJEVIĆ A, BATIČ F, *et al.* The bryophyte diversity of Ljubljana (Slovenia) [J]. *Polish Bot J*, 2013, **58**(1): 319 – 324.
- [16] 李琦, 籍霞, 王恩辉, 等. 苔藓植物对青岛市大气重金属污染的生物监测作用[J]. 植物学报, 2014, **49**(5): 569 – 577.
- LI Qi, JI Xia, WANG Enhui, *et al.* Using bryophytes as biomonitor atmospheric heavy metal deposition in the city of Qingdao [J]. *Chin Bull Bot*, 2014, **49**(5): 569 – 577.
- [17] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 苔藓植物与环境重金属污染监测[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(2): 201 – 206.
- AN Li, CAO Tong, YU Yinghao. Bryophytes and environmental heavy metal pollution monitoring [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25**(2): 201 – 206.
- [18] 李进猛, 王定勇, 陈益, 等. 重庆市不同功能区苔藓植物重金属含量及吸附特性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, **37**(9): 68 – 73.
- LI Jinmeng, WANG Dingyong, CHEN Yi, *et al.* Heavy metal contents of bryophytes and their adsorption characteris-

- tics in different functional zones of Chongqing [J]. *J Southwest China Norm Univ Nat Sci Ed*, 2012, **37**(9): 68 – 73.
- [19] 陈勤, 沈羽, 方炎明, 等. 泰州市区空气重金属污染的多重监测研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38**(3): 139 – 143.
- CHEN Qin, SHEN Yu, FANG Yanming, *et al.* Multiple approaches for monitoring the air heavy metal pollution in Taizhou [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2014, **38**(3): 139 – 143.
- [20] 张银龙, 陆亚芳, 王亚超. 大气污染梯度下树木附生苔藓植物生理生化指标的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, **30**(5): 5 – 9.
- ZHANG Yinlong, LU Yafang, WANG Yachao. The change of physiological and biochemical indexes in the bodies of epiphytic bryophytes under different air pollution [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci*, 2006, **30**(5): 5 – 9.
- [21] 王壮, 杨万勤, 吴福忠, 等. 高山森林粗木质残体附生苔藓植物的重金属吸存特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(9): 3028 – 3035.
- WANG Zhuang, YANG Wanqin, WU Fuzhong, *et al.* Heavy metal absorption characteristics of epiphytic moss on coarse woody debris in an alpine forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(9): 3028 – 3035.
- [22] 杨敏, 鲁小珍, 袁芳敏, 等. 南京市植物物种多样性现状及保护对策[J]. 中国城市林业, 2014, **12**(2): 25 – 27, 34.
- YANG Min, LU Xiaozhen, YUAN Fangmin, *et al.* Current situation of plant species diversity in Nanjing and its conservation strategy [J]. *J Chin Urban For*, 2014, **12**(2): 25 – 27, 34.
- [23] MÄGDEFRAU K. *Bryophyte Ecology: Life-forms of Bryophytes* [M]. Dordrecht: Springer, 1982: 45 – 58.
- [24] 黎兴江. 中国苔藓志: 第3卷[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [25] 高谦. 中国苔藓志: 第2卷[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [26] 张力, 左勤. 中国高等植物彩色图鉴: 第1卷 苔藓植物[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [27] WHITTAKER R H. Evolution and measurement of species diversity [J]. *Taxon*, 1972, **21**: 213 – 251.
- [28] PIELOU E C. *Ecological Diversity* [M]. New York: Wiley, 1975.
- [29] 马克平. 生物群落多样性的测度方法[G]//钱迎萍, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141 – 165.
- [30] 王剑, 曹同, 王敏, 等. 苏州园林苔藓植物多样性及其特点[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(6): 1239 – 1246.
- WANG Jian, CAO Tong, WANG Min, *et al.* Biodiversity and it's characteristics of bryophytes in the Suzhou Gardens [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2007, **27**(6): 1239 – 1246.
- [31] 宋红涛, 郭水良, 沈蕾, 等. 江苏宝华山自然保护区苔藓植物多样性及其分布与环境关系研究[J]. 山地农业生物学报, 2010, **29**(6): 482 – 489.
- SONG Hongtao, GUO Shuiliang, SHEN Lei, *et al.* Bryophyte diversity and relationship between distribution and environmental factors in Baohuashan natural reserve, Jiangsu Province [J]. *J Mount Agric Biol*, 2010, **29**(6): 482 – 489.
- [32] RAMBO T R. Decaying logs and habitat heterogeneity: implications for bryophyte diversity in western Oregon forests [J]. *Northwestence*, 2001, **75**(3): 270 – 279.
- [33] SMITH A J E. *Bryophyte Ecology* [M]. Berlin: Springer Press, 1982.
- [34] 陈勤, 孙冲, 方炎明. 苔藓植物的生态环境指示作用[J]. 世界林业研究, 2013, **26**(2): 19 – 23.
- CHEN Qin, SUN Chong, FANG Yanming. Review on bio-monitoring of bryophyte to environment changes [J]. *World For Res*, 2013, **26**(2): 19 – 23.
- [35] 申家琛, 张朝晖, 王智慧. 石漠化程度对苔藓植物多样性及其结皮土壤化学性质的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(17): 6043 – 6054.
- SHEN Jiachen, ZHANG Zhaohui, WANG Zhihui. The effects of rocky desertification degree on bryophyte diversity and soil chemical properties of crusts [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(17): 6043 – 6054.