



## 湿地公园苔藓植物群落特征及其与环境因子的关系——以贵阳市为例

段礼鑫, 王秀荣, 廖芳, 谢木妍

引用本文:

段礼鑫, 王秀荣, 廖芳, 谢木妍. 湿地公园苔藓植物群落特征及其与环境因子的关系——以贵阳市为例[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(5): 589–600.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4800>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 贵阳喀斯特城市墙壁苔藓植物物种多样性研究

Study on Diversity of Bryophytes on the Wall in Karst Urban Guiyang City

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 473–480 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3890>

##### 粤东亚热带森林群落树种组成对苔藓植物分布的影响

Influence of Tree Species Composition in Subtropical Forest Communities on Bryophyte Distribution in Eastern Guangdong

热带亚热带植物学报. 2019, 27(4): 376–382 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4029>

##### 水淹对消落带水生苔藓植物优势种生理生态特征的影响及耐水淹评价

Effects of Waterlogging on Eco-physiological Characteristics of Aquatic Bryophytes and Their Comprehensive Evaluation of Water Tolerance in Hydro-fluctuation Belt

热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 65–72 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3626>

##### 广州市湿地公园植物调查与分析

Investigation and Analysis on Plants of Wetland Parks in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2020, 28(6): 607–614 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4178>

##### 广西中越边境喀斯特地区叶附生苔类植物物种多样性研究

Study on Species Diversity of Epiphyllous Liverworts in Karst Region of Guangxi–Vietnam Border

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 481–489 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3870>

向下翻页，浏览PDF全文

# 湿地公园苔藓植物群落特征及其与环境因子的关系 ——以贵阳市为例

段礼鑫, 王秀荣\*, 廖芳, 谢木妍

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 苔藓植物作为湿地公园的植物组成成分之一, 开展其群落构建的研究, 可为湿地生态系统管理和生物多样性维持机制提供重要理论依据。贵阳湿地和苔藓植物资源丰富, 以贵阳市 3 个典型湿地公园为对象, 研究苔藓植物的物种分布特征和环境因子, 采用双向指示种分析(TWINSpan)和典范对应分析(CCA)方法对苔藓植物群丛进行数量分类和排序。结果表明, 贵阳市 3 个典型湿地公园有苔藓植物 17 科 28 属 66 种, 其中, 丛藓科(Pottiaceae)、灰藓科(Hypnaceae)、青藓科(Brachytheciaceae)为优势科; 3 个湿地公园苔藓植物  $\beta$  多样性差异较小, 物种相似度高, 丰富度低。苔藓植物分布的生境类型主要为石生与树生; 生活型以交织型和丛集型为主。苔藓植物群丛类型可以分为 13 类, 均有各自的特征, 其物种组成和群落特征能较好的反映群丛类型与环境之间的关系, 3 个湿地公园的生境具有相似性。CCA 分析结果表明, 影响湿地公园中苔藓植物群丛分布的首要环境因子是海拔, 其次是空气湿度, 再次是郁闭度, 光照也有一定影响。

**关键词:** 湿地公园; 苔藓植物; 群落特征; 环境因子

doi: 10.11926/jtsb.4800

## Characteristics of Bryophyte Community in Wetland Park and Its Relationship with Environment Factors: A Case Study of Guiyang City

DUAN Lixin, WANG Xiurong\*, LIAO Fang, XIE Muyan

(Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** As one of the plant components of wetland park, the study of bryophyte community construction can provide important theoretical basis for wetland ecosystem management and biodiversity maintenance mechanism. Guiyang is rich in wetland and bryophyte resources. Based on three typical wetland parks in Guiyang, the species distribution of bryophytes and its relationship with environmental factors were studied. TWINSpan analysis and canonical correspondence analysis (CCA) were used to quantitatively classify and rank the bryophytes community. The results showed that there were 17 families, 28 genera and 66 species of bryophytes in three typical wetland parks, among which Pottiaceae, Hypnaceae and Brachytheciaceae were dominant families. There was little difference in  $\beta$  diversity of bryophytes among the three wetland parks, with high species similarity and low richness. The habitats of bryophytes were mainly lithophyte and arboreal. The life forms were mainly interleaved and clustered. Bryophyte community could be divided into 13 types, all of which had their own characteristics, and their species composition and community characteristics could better reflect the relationship between the bryophyte type and environment factors. The habitats of the three wetland parks were similar. The results of CCA analysis showed that the primary environmental factor affecting the distribution of moss clusters in wetland park

收稿日期: 2023-04-22 接受日期: 2023-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960328)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31960328).

作者简介: 段礼鑫(1994 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为园林与景观设计。E-mail: 1125699203@qq.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxr7211@126.com

was altitude, followed by air humidity, canopy density, and light also had a certain effect. These provide a scientific basis for the conservation of bryophyte diversity in wetland park.

**Key words:** Wetland park; Bryophyte; Community characteristics; Environmental factor

“湿地”生态系统为生物提供了良好的栖息环境<sup>[1]</sup>, 湿地植被中特殊的生态功益对于衡量湿地生态功能和生态系统稳定性有着极为显著的作用<sup>[2]</sup>。苔藓植物是湿地公园的植被组成成分之一, 其独特的形态结构和生理特征<sup>[3]</sup>, 在维持生物多样性、保持水土、涵养水源等方面具有重要作用<sup>[4-5]</sup>。研究表明, 苔藓植物群落特征可以反映城市环境变化梯度<sup>[6]</sup>, 其与环境因子的研究可以促进当地群落稳定性的维持和生物多样性的保护<sup>[7]</sup>, 探讨苔藓植物群落特征及其与环境关系具有重要科学价值。目前围绕苔藓植物群落与环境关系的研究主要集中于自然保护区<sup>[8]</sup>、喀斯特地区<sup>[9-10]</sup>和西藏<sup>[11]</sup>等区域, 关于湿地公园中苔藓植物的研究仅在鄱阳湖<sup>[12]</sup>、福泉岔河<sup>[13]</sup>、杭州西溪<sup>[14]</sup>、贵州娘娘山<sup>[15]</sup>等区域有相关探讨: 鄱阳湖湿地的苔藓植物物种丰富度受水位梯度的影响较大; 福泉岔河国家湿地公园的石生苔藓植物群落占据了绝对优势; 西溪湿地的苔藓植物种类丰富度和特有性较低, 以土生群落为主, 生活型较为单一; 贵州娘娘山国家湿地公园的区系符合其所处地理位置, 且土壤 pH 可作为代表性环境因子。以上研究均未涉及苔藓植物群落特征与环境因素的关系。

贵州省地处我国云贵高原, 湿地资源丰富, 贵阳城市湿地公园作为贵州湿地资源重要组成部分, 具有较为丰富的自然与旅游资源<sup>[16]</sup>, 随着湿地保护力度的加强和人类活动的加剧, 湿地公园植物群落也随之发生变化。我国学者对贵阳湿地公园中植物群落如维管束植物、蕨类植物等进行了相关探索<sup>[17]</sup>, 发现公园中植物种类繁多, 群落结构相对稳定。而苔藓植物因植株矮小, 结构简单, 往往不被重视, 有关贵阳湿地公园苔藓植物的研究非常有限<sup>[18]</sup>。湿地环境可以形成局地小气候, 从而影响湿地植物群落构建<sup>[19]</sup>, 这种环境差异对湿地苔藓植物分布的影响尚不清楚, 因此需加强苔藓植物群落与环境关系研究来阐明湿地植物群落的构建与维持机制。此外, 数量分类和排序是系统描述植被特征的有效手段, 能够客观揭示植被与环境因子间的生态关系, 有利于保护生物多样性和推动生态系统的发展<sup>[20]</sup>。因此, 本研究以贵阳市典型湿地公

园的苔藓植物群落为研究对象, 应用双向指示种分析(Two-Way indicator species analysis, TWINSpan)和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)方法进行数量分类和排序, 旨在揭示贵阳市湿地公园苔藓植物物种组成、群落特征和影响群落分布的环境因子, 以期为湿地公园生态系统的生物多样性保护提供科学依据, 为苔藓植物的后期研究提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

贵阳地貌属于以山地、丘陵为主的丘原盆地地区, 亚热带湿润温和型气候, 年平均气温 15.3 °C, 相对湿度 77%, 年降水量大, 水域资源丰富, 湿地总面积为 16 017.93 hm<sup>2</sup>, 占全市国土面积的 2.03%, 湿地保护率为 74.42%, 湿地类型划分为河流湿地、沼泽湿地、人工湿地 3 类。本研究选取位于贵阳市内不同区域中具有代表性的 3 个湿地公园作为研究区域, 阿哈湖国家湿地公园(106°67'38" E, 26°54'62" N)、观山湖公园(106°37'44" E, 26°38'48" N)、花溪十里河滩国家城市湿地公园(106°68'04" E, 26°49'30" N)。平均海拔分别为 1 260、1 200、1 140 m, 年均温分别为 15.3 °C、15.0 °C、14.9 °C。公园大小和水域面积基本涵盖了大、中、小 3 种类型, 均为自然与人工生态系统相结合的城市湿地公园<sup>[18]</sup>。境内苔藓植物种类丰富, 群落长势良好。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样方调查

于 2022 年 1 月—2 月对 3 个湿地公园苔藓植物群落进行调查。湿地公园两岸植物通常受到环境与地理因素的影响, 导致临水区、近水区、远水区的植物群落结构有较大差异<sup>[21]</sup>。因此本研究沿着湿地公园所辖区域内的河道两岸不同距水区(≤10、10~50、50~100 m)设置 10 m×10 m 的样地(每个样地间隔距离≥10 m), 共计 101 个(图 1), 其中阿哈湖国家湿地公园 34 个, 观山湖公园 37 个, 花溪十里河滩国家城市湿地公园 30 个。在样地内选择集中成片、具代

表性的不同生境(土生、石生、树生)苔藓植物群落(树附生苔藓选取胸径 $\geq 15\text{ cm}$ 的寄主树木)<sup>[22]</sup>, 根据实际情况运用五点取样法与等距取样法结合, 每个样地设置 3~5 个样方, 共调查 445 个, 样方大小为  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ , 用划分成  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$  的 100 个小格样方框取样, 并对不同种类的苔藓植物盖度进行测定<sup>[23]</sup>。利用 GPS 定位海拔, 采用 LM-8000A 气象仪、DLY-1802 照度计、ZTW1601A 水分检测仪记录空气湿度、温度、光照、水分, 使用卷尺与地图软件测距结合的方法进

行样地到水流的距离测量, 将人为干扰和枯落物划分为 5 个等级<sup>[24]</sup>, 同时记录郁闭度及周边植物等环境因子。本研究共采集苔藓植物标本 279 份, 所有标本带回实验室, 采用 HWG-1 型解剖镜和 Bx43 研究级正置三目显微镜(Olympus, 日本)对标本形态进行观察, 并借助《贵州苔藓植物志》第 1、2 卷和《贵州苔藓植物图志(习见种卷)》<sup>[25-27]</sup>等资料鉴定苔藓植物物种, 凭证标本保存在贵州大学林学院实验室。根据 Mägdefrau<sup>[28]</sup>的方法对苔藓植物生活型进行划分。

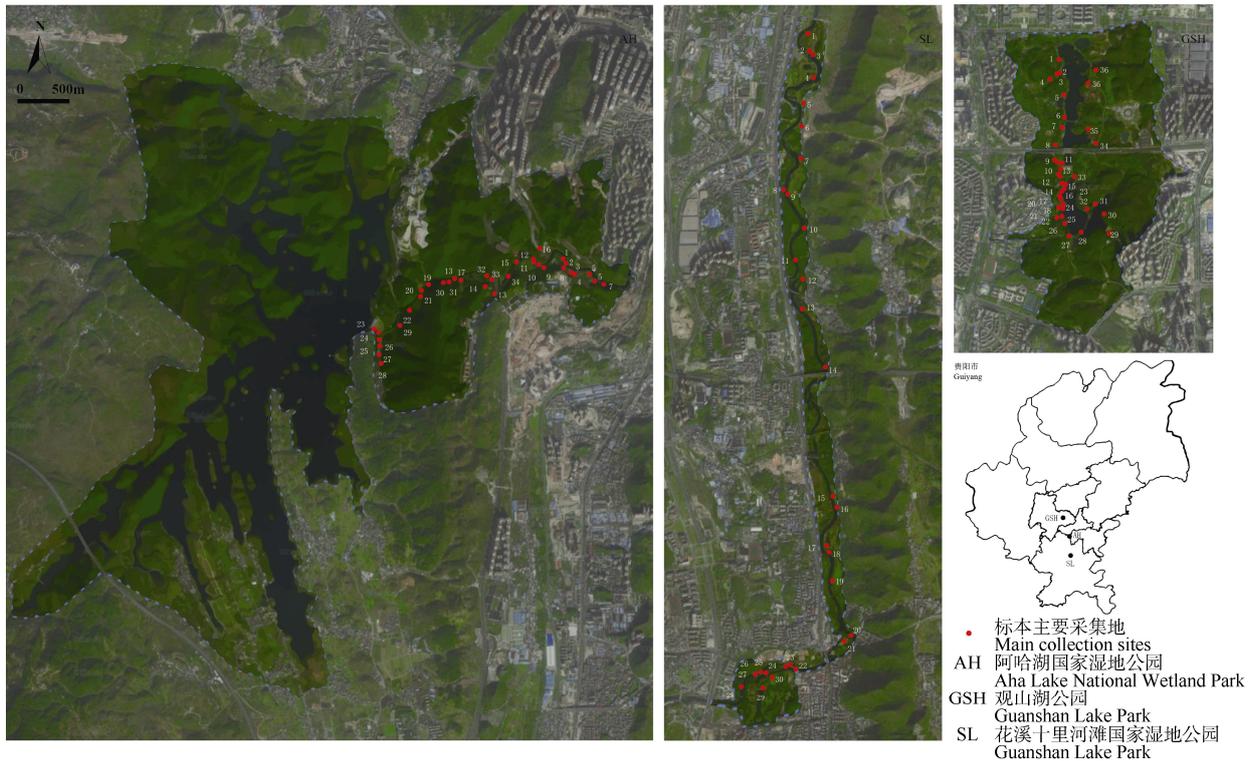


图 1 贵阳市湿地公园样地分布图

Fig. 1 Plot distribution of Guiyang wetland parks

1.2.2 数据处理

利用苔藓植物的相对盖度和相对频度计算出苔藓物种的生态重要值<sup>[29]</sup>, 生态重要值(L)=(相对盖度+相对频度)/2, 式中, 相对盖度=某种苔藓植物平均盖度/所有种类苔藓植物平均盖度之和, 相对频度=某种苔藓植物的频度/所有种类苔藓植物频度之和。

$\beta$  多样性是指生境间的物种多样性, 可以较为直观地描述群落物种组成差异, 是研究群落构建机制的重要指标<sup>[30]</sup>。本文选取 Jaccard 指数和 Sorenson 指数比较不同公园生境中苔藓植物群落间的相似性。Jaccard 指数  $C_j=j/(a+b-j)$ ; Sorenson 指数  $C_s=2j/$

$(b+c)$ , 式中,  $j$  是 2 个公园群落间共有的物种数,  $a$  和  $b$  是 2 个公园群落各自拥有的物种数。  $\beta_j$  在 0~1 之间,  $0<\beta_j<0.25$  表明 2 群落极为不相似;  $0.25\leq\beta_j<0.50$  表明 2 群落中等不相似;  $0.50\leq\beta_j<0.75$  表明 2 群落中等相似;  $0.75\leq\beta_j<1$  表明 2 群落极相似。

苔藓植物群落分类和排序使用样地的生态重要值数据, 群丛类型划分采用 PCORD 5.0 的 TWINSPAN<sup>[31]</sup>, 并结合群丛内的优势种和指示种对群丛进行命名, 软件参数设置参照田悦等<sup>[11]</sup>的划分依据。群落排序使用 Canoco 5.0 软件, 对物种在多样地的重要值矩阵数据进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 根据 DCA 排序轴

的梯度长度选择适宜的排序方法,最大轴的梯度长度大于 4,因此选择单峰模型典范对应分析对样地环境因子进行排序,探讨苔藓植物物种和群落分布与环境因子间的关系。物种重要值和环境因子数据经过 Z-score 标准化处理。通过前项选择筛选方法<sup>[32]</sup>,仅将对群丛分布具有显著影响的因子加入最终的排序模型,并对模型进行蒙特卡洛检验。

## 2 结果和分析

### 2.1 苔藓植物物种组成与多样性分析

3 个湿地公园共有苔藓植物 17 科 28 属 66 种,均为藓类植物。主要由丛藓科(Pottiaceae, 8 属 10 种)、灰藓科(Hypnaceae, 5 属 8 种)、青藓科(Brachytheciaceae, 2 属 18 种)组成,占物种总数的 51.5%。根据物种重要值排序(表 1),湿地公园苔藓植物群落的优势种(取物种总数的 10%)分别是长尖对齿藓(*Didymodon ditrichoides*)、皱叶青藓(*Brachythecium kuroishicum*)、平蒴藓(*Plagiobryum zieri*)、尖叶匐灯藓(*Plagiomnium acutum*)、粗枝青藓(*B. helminthocladum*)和多褶青藓(*B. buchananii*)。仅出现 1 次的偶见种有泥炭藓(*Sphagnum palustre*)、悬藓(*Barbella compressiramea*)、长蒴灰藓(*Hypnum macrogynum*)等 18 种。

重要值排名前 3 的物种在 3 个公园中均有分布,排名靠后的物种仅出现于 1 个公园。

对苔藓植物  $\beta$  多样性指数分析表明,阿哈湖湿地公园与十里河滩湿地公园、观山湖公园的 Sorenson 指数分别为 0.58 和 0.57, Jaccard 指数分别为 0.41 和 0.40,属于中等相似,阿哈湖湿地公园与十里河滩湿地公园共有物种 21 种,阿哈湖湿地公园与观山湖公园达 24 种。而观山湖公园与十里河滩湿地公园的 Sorenson 指数与 Jaccard 指数分别为 0.50 和 0.33,属于中等不相似。3 个公园的共有物种有 14 种,为长尖对齿藓、长肋青藓(*Brachythecium populeum*)、皱叶青藓、勃氏青藓(*B. brotheri*)、粗枝青藓、弯叶青藓(*B. reflexum*)、卵叶青藓(*B. rutabulum*)、平蒴藓、细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*)、大羽藓(*Thuidium cymbifolium*)、全缘匐灯藓(*Plagiomnium integrum*)、长喙棉藓(*Plagiothecium succulentum*)、广叶绢藓(*Entodon flavescens*)和小牛舌藓(*Anomodon minor*)。3 个公园中苔藓植物群落的生境差异较小,群落共有种较多,物种的更替速率较慢,物种丰富度较低。

### 2.2 苔藓植物的生境类型及生活型

苔藓植物的生境主要有土生、石生和树生(表 1),其中石生苔藓种类有 39 种,占总种数的 39.8%,树生占 36.7%,土生占 23.5%,重要值排名靠前的种

表 1 湿地公园苔藓植物的重要值、样地分布及生境类型

Table 1 Ecological importance value, distribution and habitat types of bryophytes in wetland Park

编号 No.	植物 Species	重要值 Importance value	样地分布 Sample plot	生境类型 Habitat type
1	长尖对齿藓 <i>Didymodon ditrichoides</i>	5.16	AH, GSH, SL	石生, 树生
2	皱叶青藓 <i>Brachythecium kuroishicum</i>	4.38	AH, GSH, SL	土生, 树生
3	平蒴藓 <i>Plagiobryum zieri</i>	3.88	AH, GSH, SL	石生, 树生
4	尖叶匐灯藓 <i>P. acutum</i>	3.39	AH, GSH	石生, 土生
5	粗枝青藓 <i>Brachythecium helminthocladum</i>	2.84	AH, GSH, SL	石生, 树生, 土生
6	多褶青藓 <i>B. buchananii</i>	2.80	GSH, SL	树生
7	大羽藓 <i>Thuidium cymbifolium</i>	2.64	AH, GSH, SL	树生
8	细叶小羽藓 <i>Haplocladium microphyllum</i>	2.50	AH, GSH, SL	石生, 树生
9	长肋青藓 <i>Brachythecium populeum</i>	2.46	AH, GSH, SL	石生, 树生
10	勃氏青藓 <i>B. brotheri</i>	2.23	AH, GSH, SL	石生, 树生, 土生
11	亚灰羽藓 <i>Thuidium subglaucinum</i>	2.08	AH, GSH	树生, 石生, 土生
12	小扭叶藓 <i>Trachypus humilis</i>	1.51	AH, SL	石生, 树生
13	弯叶青藓 <i>Brachythecium reflexum</i>	1.49	AH, GSH, SL	石生, 树生
14	绢藓 <i>Entodon cladorrhizans</i>	1.43	AH, GSH	石生, 树生
15	灰羽藓 <i>Thuidium pristocalyx</i>	1.37	GSH	土生
16	羽枝青藓 <i>Brachythecium plumosum</i>	1.14	SL	土生
17	长喙棉藓 <i>Plagiothecium succulentum</i>	1.10	AH, GSH, SL	树生
18	长肋异齿藓 <i>Regmatodon longinervis</i>	1.07	GSH	土生, 树生
19	真藓 <i>Bryum argenteum</i>	1.05	AH, SL	石生, 树生
20	多枝缩叶藓 <i>Ptychomitrium gardneri</i>	1.04	GSH, SL	石生

续表(Continued)

编号 No.	植物 Species	重要值 Importance value	样地分布 Sample plot	生境类型 Habitat type
21	卵叶青藓 <i>Brachythecium rutabulum</i>	0.82	AH, GSH, SL	石生
22	广叶绢藓 <i>Entodon flavescens</i>	0.82	AH, GSH, SL	石生, 树生
23	小牛舌藓 <i>Anomodon minor</i>	0.80	AH, GSH, SL	石生
24	疏网美喙藓 <i>Eurhynchium laxirete</i>	0.77	AH, SL	石生, 树生, 土生
25	尖叶青藓 <i>Brachythecium coreanum</i>	0.75	AH, GSH	石生
26	全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i>	0.75	AH, GSH, SL	石生, 土生
27	细枝羽藓 <i>Thuidium delicatulum</i>	0.74	GSH, SL	树生
28	卷叶丛本藓 <i>Anoetangium thomsonii</i>	0.72	SL	石生
29	长柄绢藓 <i>Entodon macropodus</i>	0.72	GSH, SL	树生
30	狭叶缩叶藓 <i>Ptychomitrium linearifolium</i>	0.72	AH, GSH	石生, 树生
31	小石藓 <i>Weissia controversa</i>	0.71	GSH, SL	树生
32	东亚拟鳞叶藓 <i>Pseudotaxiphyllum pohliaecarpum</i>	0.71	SL	土生
33	密枝灰藓 <i>Hypnum densirameum</i>	0.69	GSH	土生
34	凸尖鳞叶藓 <i>Taxiphyllum cuspidifolium</i>	0.42	AH, SL	土生
35	刺叶提灯藓 <i>Mnium spinosum</i>	0.42	AH, GSH	石生, 土生
36	黄灰藓 <i>Hypnum pallescens</i>	0.41	AH, GSH	石生, 树生, 土生
37	长蒴灰藓 <i>H. macrogynum</i>	0.40	GSH	土生
38	缺齿小石藓 <i>Weissia edentula</i>	0.39	AH, GSH	石生
39	羽枝梳藓 <i>Ctenidium pinnatum</i>	0.39	SL	石生
40	溪边青藓 <i>Brachythecium rivulare</i>	0.39	AH, SL	树生
41	薄壁卷柏藓 <i>Racopilum cuspidigerum</i>	0.39	AH, GSH	石生, 树生, 土生
42	花状湿地藓 <i>Hyophila nymaniana</i>	0.38	AH, SL	树生, 土生
43	亮叶绢藓 <i>Entodon aeruginosus</i>	0.38	GSH	土生
44	直叶棉藓 <i>Plagiothecium euryphyllum</i>	0.37	AH, GSH	石生, 树生
45	皱叶牛舌藓 <i>Anomodon rugelii</i>	0.37	AH, SL	石生, 树生
46	多枝青藓 <i>Brachythecium fasciculirameum</i>	0.37	GSH	树生
47	东亚扭口藓 <i>Barbula subcomosa</i>	0.37	SL	石生
48	短尖美喙藓 <i>Eurhynchium angustirete</i>	0.36	SL	土生
49	反叶对齿藓 <i>Didymodon ferrugineus</i>	0.36	GSH	石生
50	泥炭藓 <i>Sphagnum palustre</i>	0.35	GSH	石生
51	小叶美喙藓 <i>Eurhynchium filiforme</i>	0.35	GSH	石生
52	扭尖美喙藓 <i>E. kirishimense</i>	0.35	GSH	土生
53	狭叶拟合睫藓 <i>Pseudosymblypharis angustata</i>	0.35	GSH	石生
54	梳藓 <i>Ctenidium molluscum</i>	0.34	GSH	土生
55	悬藓 <i>Barbella compressiramea</i>	0.34	GSH	树生
56	拟灰羽藓 <i>Thuidium glaucinoides</i>	0.34	GSH	树生
57	纤枝同叶藓 <i>Isopterygium minutirameum</i>	0.34	GSH	树生
58	长枝砂藓 <i>Racomitrium ericoides</i>	0.15	AH	石生
59	短肋羽藓 <i>Thuidium kanadae</i>	0.11	AH	树生
60	毛尖青藓 <i>Brachythecium piligerum</i>	0.07	AH	石生
61	密枝青藓 <i>B. amnicola</i>	0.05	AH	石生, 树生
62	具喙匍灯藓 <i>Plagiomnium rhynchophorum</i>	0.04	AH	土生
63	毛口藓 <i>Trichostomum brachydontium</i>	0.04	AH	石生, 树生
64	扭口红叶藓 <i>Bryoerythrophyllum inaequalifolium</i>	0.04	AH	石生
65	卷叶湿地藓 <i>Hyophila involuta</i>	0.01	AH	石生
66	青藓 <i>Brachythecium pulchellum</i>	0.01	AH	树生

AH: 阿哈湖湿地公园; GSH: 观山湖公园; SL: 十里河滩湿地公园。

AH: Ahahu Wetland Park; GSH: Guanshan Lake Park; SL: Shilihetan Wetland Park.

类均分布于石生和树生环境中, 而土生环境中的苔藓植物重要值均靠后, 部分苔藓植物可在多种生境

定居。表明石生与树生的苔藓植物种类更适宜于湿地公园的环境生长。

苔藓植物物种共出现交织型、丛集型、悬垂型、垫状型和倾斜型 5 种生活型。其中, 交织型共有 162 种, 以青藓科、灰藓科和羽藓科(*Thuidiaceae*)为代表, 分别占样地总物种数的 54.0%、63.6%和 55.7%; 丛集型有 92 种, 以丛藓科和真藓科(*Bryaceae*)为主, 占样地总物种数的 35.0%和 29.3%; 悬垂型、垫状型和倾斜型最少, 分别有 15、9 和 2 种, 占有样地的 15.4%、10.5%和 2.4%。

### 2.3 苔藓植物群落分类及特征

TWINSPAN 经过 6 次分类, 将 101 个样地划分为 13 个群丛(图 2), 各群丛主要环境因子见表 2。

群丛 1: 短肋羽藓(*Thuidium kanedae*)群丛, 位于阿哈湖湿地公园, 空气湿度最低, 光照最高, 苔藓植物总平均盖度较高为 90%。

群丛 2: 多褶青藓+长喙棉藓+长柄绢藓(*Entodon macropodus*)+多枝青藓(*Brachythecium fasciculirameum*)群丛, 包括 5 个样地, 其中 4 个位于观山湖公园, 1 个位于十里河滩湿地公园, 平均光照最低, 平均海拔、空气湿度和郁闭度较高, 苔藓植物总平均盖度较高为 88.4%。

群丛 3: 亚灰羽藓(*Thuidium subglaucinum*)群丛, 包括 8 个样地, 主要位于阿哈湖湿地公园和观山湖公园, 平均光照较高, 苔藓植物总平均盖度较低仅为 81.8%。

群丛 4: 尖叶匍灯藓+长肋青藓+勃氏青藓+灰羽藓(*Thuidium pristocalyx*)+小牛舌藓+密枝灰藓(*Hypnum densirameum*)+梳藓(*Ctenidium molluscum*)+密枝青藓(*Brachythecium amnicola*)群丛, 包括 3 个

样地, 2 个位于阿哈湖湿地公园, 1 个位于观山湖公园, 平均郁闭度和光照较高, 苔藓植物总平均盖度较高为 92.7%。

群丛 5: 长肋异齿藓(*Regmatodon longinervis*)+多枝缩叶藓(*Ptychomitrium gardneri*)+卵叶青藓群丛, 包括 4 个样地, 1 个位于十里河滩湿地公园, 3 个位于观山湖公园, 平均空气湿度较高为 88.7%, 平均郁闭度较低, 仅 41%, 苔藓植物总平均盖度中等。

群丛 6: 平蒴藓+尖叶匍灯藓+粗枝青藓+长肋青藓+尖叶青藓(*Brachythecium coreanum*)群丛, 包括 9 个样地, 分布于 3 个公园, 平均海拔较高为 1 200 m, 苔藓植物总平均盖度较高。

群丛 7: 小扭叶藓原变种(*Trachypus humilis*)+真藓(*Bryum argenteum*)+卵叶青藓+小牛舌藓+全缘匍灯藓+狭叶缩叶藓(*Ptychomitrium linearifolium*)+薄壁卷柏藓(*Racopilum cuspidigerum*)+皱叶牛舌藓(*Anomodon rugelii*)+青藓(*Brachythecium pulchellum*)群丛, 包括 4 个样地, 其中 3 个位于阿哈湖湿地公园, 1 个位于十里河滩湿地公园, 样地平均海拔 1 064 m, 苔藓植物总平均盖度较高。

群丛 8: 长尖对齿藓+平蒴藓+绢藓(*Entodon cladorrhizans*)+广叶绢藓群丛, 包括 24 个样地, 分布于 3 个湿地公园, 样地海拔从 1 045 到 1 255 m 均有分布, 郁闭度最小为 0, 最大为 95%, 苔藓植物总平均盖度较高。

群丛 9: 皱叶青藓+弯叶青藓群丛, 包括 18 个样地, 分布于 3 个湿地公园, 平均郁闭度较高为 70%, 苔藓植物总平均盖度中等。

表 2 各群丛的主要环境变量

Table 2 Main environmental variables of each cluster

群丛 Cluster	海拔 (m) Altitude	相对湿度 % Relative humidity	郁闭度 % Density of tree canopy	光照强度 (Ft-cd) Light intensity	样地数 Number of plot	总平均盖度 % Total mean coverage
1	1 045(1 045)	54.6(54.6)	62(62)	987.1(987.1)	AH(1)	90.0
2	1 070~1 255(1 204)	70.0~96.7(89.9)	20~98(70)	100.3~275.7(183.1)	GSH(4)、SL(1)	88.4
3	1 036~1 237(1 143)	59.2~95.5(70.1)	20~96(54)	175.4~879.0(532.1)	AH(4)、GSH(4)	81.8
4	1 047~1 227(1 111)	63.1~89.4(74.5)	60~92(80)	303.4~885.1(576.1)	AH(2)、GSH(1)	92.7
5	1 069~1 254(1 193)	69.9~95.3(88.7)	20~58(41)	178.5~561.7(410.2)	GSH(3)、SL(1)	85.8
6	1 059~1 249(1 200)	62.1~97.5(84.9)	15~98(65)	133.3~997.2(416.4)	AH(1)、GSH(7)、SL(1)	89.1
7	1 056~1 072(1 064)	62.0~70.9(65.3)	30~98(62)	162.2~475.3(358.4)	AH(3)、SL(1)	92.5
8	1 045~1 255(1 126)	52.3~98.2(73.8)	0~95(55)	130.3~1359.7(445.8)	AH(9)、GSH(9)、SL(6)	87.0
9	1 042~1 250(1 121)	52.6~98.2(74.8)	28~98(70)	100.7~1015.2(417.5)	AH(5)、GSH(6)、SL(7)	86.6
10	1 043~1 069(1 052)	42.5~73.8(65.8)	25~98(72)	136.1~674.9(457.5)	AH(3)、SL(2)	80.6
11	1 037~1 214(1 071)	55.2~73.8(66.2)	5~90(57)	100.4~1124.5(502.0)	AH(4)、GSH(1)、SL(7)	81.8
12	1 126~1 124(1 235)	84.5~97.7(91.1)	45~48(47)	151.1~347.8(249.5)	GSH(2)	93.5
13	1 033~1 063(1 052)	10.9~72.8(57.2)	0~95(30)	142.0~846.8(376.0)	AH(2)、SL(4)	82.8

群丛 10: 勃氏青藓+刺叶提灯藓(*Mnium spinosum*)+花状湿地藓(*Hyophila nymaniana*)群丛, 包括 5 个样地, 主要在阿哈湖湿地公园和十里河滩湿地公园, 平均海拔较低, 仅为 1 052 m, 而平均郁闭度较高, 苔藓植物总平均盖度最低, 仅为 80.6%。

群丛 11: 大羽藓+细叶小羽藓群丛, 包括 12 个样地, 分布于 3 个湿地公园, 样地平均海拔为 1 071 m, 郁闭度从 5%到 90%均有分布, 苔藓植物总平均盖度较低。

群丛 12: 灰羽藓+亮叶绢藓(*Entodon aeruginosus*)群丛, 包括 5 个样地, 均位于观山湖公园, 平均海拔和平均相对湿度最高, 分别为 1 235 m 和 91.1%, 而平均光照较低, 苔藓植物总平均盖度最高为 93.5%。

群丛 13: 小扭叶藓原变种+羽枝青藓(*Brachythecium plumosum*)+凸尖鳞叶藓(*Taxiphyllum cuspidifolium*)群丛, 包括 6 个样地, 分别位于阿哈湖湿地公园和十里河滩湿地公园, 是平均海拔较低的群丛, 平均空气湿度和郁闭度也最低, 仅为 57.2%和 30%, 苔藓植物总平均盖度较低。

2.4 苔藓植物群落与环境因子的关系

采用前向选择法剔除冗余变量, 最终从 9 个环境因子(海拔、郁闭度、空气湿度、空气温度、光照强度、基质水分、枯落物、人为干扰、距水距离)中筛选出 4 个对苔藓植物群落分布具有显著性影响的环境因子(表 3), 分别为海拔、空气湿度、郁闭度和光照强度。蒙特卡洛检验结果表明, 所有典范轴

通过统计检验( $P=0.002$ ), 前 2 轴累计方差贡献率占总特征值的 60.66%, 表明 CCA 能够较好地描述群丛和环境因子之间的关系。根据各环境因子的决定系数  $R^2$  值可知, 海拔是首要的环境影响因子, 其次是空气湿度, 再次是郁闭度, 光照也有一定影响。因前 2 轴物种数据包含了大部分环境信息, 故采用前 2 轴绘制样地-环境因子的二维空间排序图。

101 个样地与 4 个环境因子的 CCA 排序结果见图 3。沿 CCA 排序轴第 1 轴从左到右, 主要反映郁闭度与光照的梯度变化, 且两者成负相关。沿 CCA 排序轴第 2 轴从上到下, 空气湿度逐渐增加, 而海拔逐渐降低, 空气湿度与郁闭度夹角较小, 说明两者关系密切, 相关性较高, 能同时对物种分布产生影响。

结合各群丛环境因子特征(表 3)和 4 个象限的环境特征分析(表 4)可知, 13 个群丛在排序图中所呈现的规律分布如下: 群丛 1 和 7 仅位于第二象限, 与其他群丛差异显著, 空气湿度和郁闭度对群丛具有强烈影响。群丛 2、5 分布于 3 个象限, 所含样地均位于观山湖公园和十里河滩湿地公园, 主要环境影响因子为平均光照和海拔。群丛 4、10 主要分布在第一、二和二、三 2 个象限, 所含样地较少, 平均空气湿度较高。群丛 12 中包含 2 个样地, 均位于观山湖公园, 平均海拔较高, 但光照较低。群丛 13 分布于第一、二、四象限, 环境因子平均值均较低。群丛 3、6、8、9 和 11 在 4 个象限均有分布, 且面积差异较小, 群丛所包含样地较多, 环境因子变幅

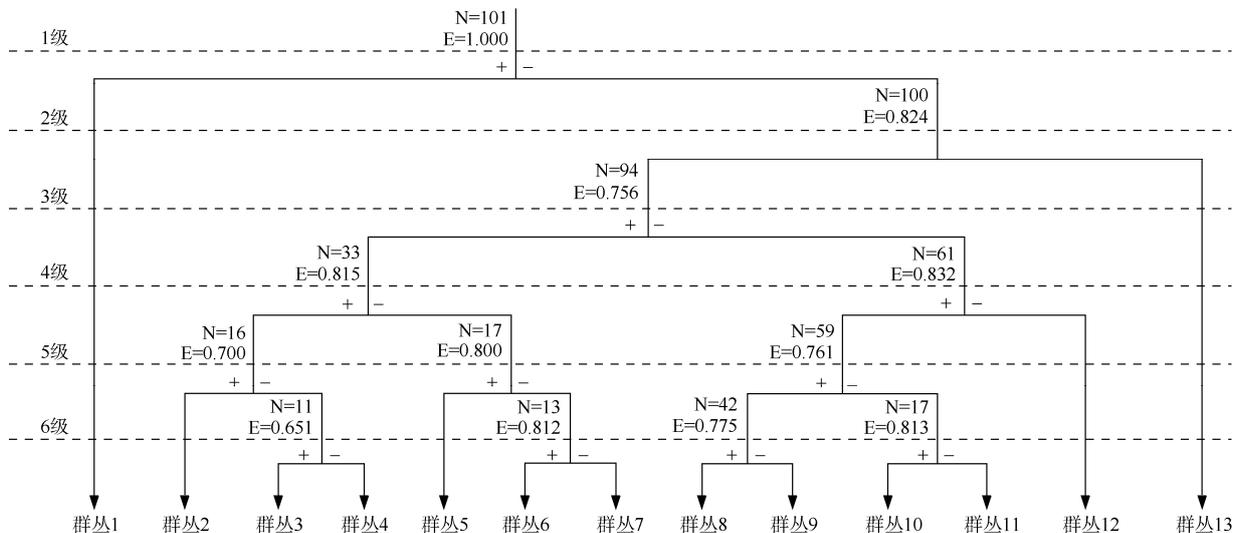


图 2 样地 TWINSpan 分类树状图。级数: 分类水平; N: 样地数量; E: 特征值。

Fig. 2 TWINSpan tree of plots. Series: Classification level; N: Number of plot; E: Characteristic value.

表 3 基于 CCA 分析的显著环境因子与特征值

Table 3 Significant environmental factors and eigenvalues based on CCA analysis

项目 Item	Axis 1	Axis 2	环境变量 Environmental variables	R <sup>2</sup>	Pr (>r)
特征值 Eigenvalues	0.500 3	0.398 6	海拔 Altitude	0.580	0.002*
解释差异(累积) Explained variation	2.040 0	3.660 0	空气湿度 Air humidity	0.530	0.004*
相关系数 Pseudo-canonical correlation	0.819 6	0.749 1	郁闭度 Density of tree canopy	0.468	0.012*
解释拟合变化(累积) Explained fitted variation	33.760 0	60.660 0	光照强度 Light intensity	0.442	0.044*

\*: P<0.05

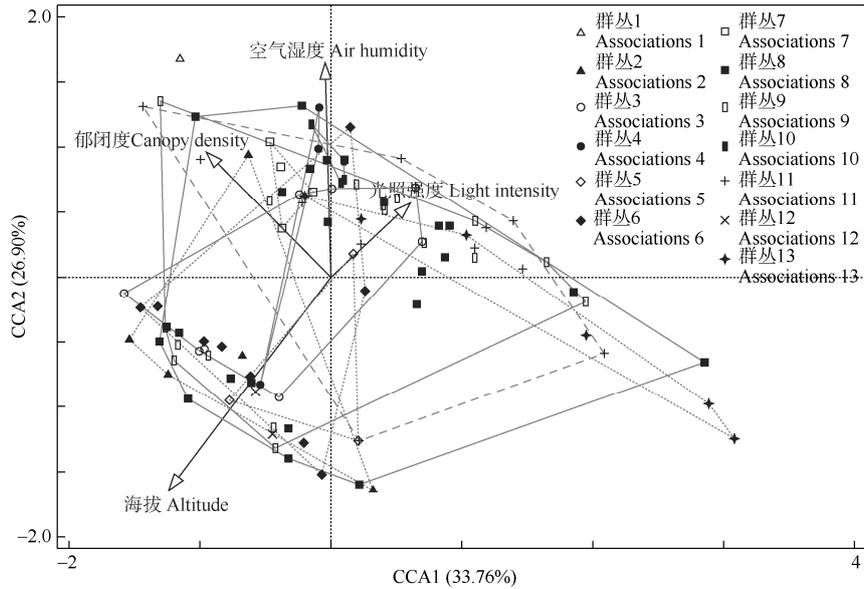


图 3 样地与环境因子典范对应分析(CCA)排序图

Fig. 3 Canonical correspondence analysis (CCA) sequence diagram between plots and environmental factors

表 4 4 个象限的环境特征分析

Table 4 Analysis of environmental characteristics in four quadrants

群丛 Cluster	象限 Quadrant	环境特征 Environment characteristics
1	2	平均空气湿度偏低, 郁闭度较高 Low average air humidity, high canopy density
2	2-4	平均海拔较高, 平均光照变幅大 High average elevation, large average light variation
3	1-4	环境因子平均值适中 Moderate average value of environmental factors
4	2-3	平均空气湿度较高 High average air humidity
5	1, 3, 4	平均光照与海拔影响强烈, 郁闭度较低 Strongly influenced by average light and altitude, low canopy density
6	1-4	平均海拔较高, 郁闭度较低 High average altitude, low canopy density
7	2	平均空气湿度与郁闭度较高 High average air humidity and canopy density
8	1-4	样地最多, 环境因子变幅最大 Largest number of plot, largest range of environmental factors
9	1-4	环境因子平均值适中, 平均郁闭度较高 Moderate mean value of environmental factors, high canopy density
10	1, 2	平均海拔较低, 空气湿度较高 Low average altitude, high air humidity
11	1-4	环境因子变幅大, 郁闭度较高 Large range of environmental factors, high canopy density
12	3	平均海拔较高, 光照较低 High average altitude, low light intensity
13	1, 3, 4	平均海拔较低, 受光照影响强烈 Low average altitude, strongly influenced by light

大, 其中, 群丛 3 优势种以青藓科和羽藓科为主, 群丛 6、8 以羽藓科和真藓科为主, 群丛 9 以真藓科和青藓科为主, 群丛 11 以真藓科和羽藓科为主, 5 个样地优势种均有重叠。因此, 排序图上群丛间的

部分样地出现重叠, 表明群丛具有相似性及植被与环境关系的复杂性。

综上所述, 通过样地与环境因子 CCA 排序图可以直观地看出各群丛间的关系, 环境因子影响着苔

藓群丛的分布,且都有各自的物种组成和群落特征,除极个别群丛的环境因子明显区别于其他群丛外,大多数群丛之间的环境因子具有相似性。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 苔藓植物物种组成与多样性特征

贵阳市3个湿地公园共有苔藓植物17科28属66种,主要由丛藓科、灰藓科、青藓科组成,3科的物种数占总物种数的51.5%,是3个湿地公园的主要类群。其物种组成特点与福泉岔河国家湿地公园<sup>[13]</sup>、六盘水娘娘山国家湿地公园<sup>[15]</sup>和喀斯特地区<sup>[9]</sup>苔藓植物的研究结果一致,可能是由于研究区均位于贵州省内,湿地周边环境条件相似,导致物种组成和分布差异较小。优势种以长尖对齿藓和皱叶青藓物种为主(重要值>4),2类苔藓植物在不同生境中广泛分布且适应性强<sup>[33]</sup>,而群落偶见种占物种总数的1/3,表明一部分种类在湿地公园中的生态幅度较窄,这可能是导致苔藓群丛类型差异的原因之一。此外,本研究结果表明3个公园苔藓植物的 $\beta$ 多样性指数为0.50~0.58,相似性较高且群落共有种较多,但物种丰富度较低,这可能与公园所处位置优越,人为干扰强烈相关,研究表明强度或持续干扰会降低苔藓植物多样性<sup>[34]</sup>。苔藓植物多样性分布也会受到其他因素的影响,应综合考虑湿地中苔藓植物对不同生境因子的变化。

#### 3.2 苔藓植物生境特征与生活型

苔藓植物很少有专一性生境,即使是同一种苔藓植物也可以生长在不同的生境,因此形成了复杂的分布格局<sup>[35]</sup>。3个公园苔藓植物的生境类型以石生与树生分布最多,这可能是由于公园以喀斯特地貌为主,在小车河流域和十里河滩沿岸水边岩面、林下和阴蔽处的潮湿石壁为石生苔藓植物生长提供了差异性的微环境;同时公园内植物多样性高,空气湿度较大,树生苔藓植物易生长在相对湿度稍大、温度较低的树干基部,进一步表明了水湿条件是影响不同苔藓植物类群分布的重要因素<sup>[36]</sup>。生活型是植物对环境因子的响应特征<sup>[37]</sup>。在本研究中,生活型主要以交织型为主,多见于湿地公园树林区的岩面薄土等较为湿润且郁闭度高的地区;丛集型仅次于交织型,在所采集区域中,植被覆盖度较低,散射的阳光可满足苔藓植物生长需要,这与李婷婷等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。因此,苔藓植物的生境类型

与生活型特点反映了湿地公园的环境特征,在其群落构建过程中应考虑生境条件与苔藓植物生活型特征。

#### 3.3 苔藓植物群落分类特征

本研究表明13个群丛均有各自的物种组成和群落特征。短肋羽藓群丛在第一级分类时即完成,明显不同于其他群丛,研究显示其空气湿度最低且光照最强;而同为羽藓科的群丛3与群丛11,在环境梯度变化上幅度却较大,说明羽藓科能适应不同的生态环境<sup>[38]</sup>。群丛2与群丛13因其特殊生境和环境条件,二者在CCA排序图中有明显的界限,群丛2平均光照最低,平均海拔、空气湿度与郁闭度较高,群丛13则完全相反,表明群落分类结果良好,环境梯度影响苔藓植物群落组成和群丛类型的间断性。以丛藓科为主的其他群丛在3个湿地公园均有分布,可见苔藓植物群落类型较好反映了3个湿地公园环境条件的相关性,群丛类型可为湿地苔藓植物群落构建提供参考。

#### 3.4 苔藓植物群落与环境的关系

CCA排序较好地揭示了湿地公园苔藓植物群丛分布随环境梯度的变化规律。本研究表明,海拔、空气湿度、郁闭度和光照强度4个环境因子共同对湿地公园的苔藓植物群丛的分布产生作用,其中,海拔与空气湿度影响最大。海拔梯度作为环境因子的综合反映,其包含了降水量、温度、湿度、基质性质等生境因子,这些因子影响着苔藓植物群落的组成和分布<sup>[39]</sup>。本研究3个湿地公园的平均海拔存在差异,海拔较高的苔藓植物群落,其覆盖度也较高,这与Silva等<sup>[40]</sup>的研究结论相似。以河流湿地为主的十里河滩湿地公园的海拔较低,与另外2个公园之间存在明显的环境异质性。另外,湿度是苔藓植物群落结构分布的关键影响因子和驱动因素<sup>[41]</sup>,且湿度和苔藓覆盖度呈正相关<sup>[42]</sup>,其微环境的形成影响了苔藓植物的分布和生长,这主要由于3个湿地公园年均相对湿度较高,林下环境优越,因而形成了较为稳定的异质性环境。同时,郁闭度和光照联系紧密<sup>[43]</sup>,本研究也表明苔藓植物的生长与两者存在显著的相关性,原因在于树木的密度与光的异质性对苔藓植物的覆盖与生长有影响<sup>[44]</sup>,郁闭度可能通过改变微生境的水分和光照条件影响苔藓群落的分布,而耐荫类苔藓植物的光合作用和代谢活动更适宜在弱光环境进行,是对环境长期适应和变异的结果<sup>[13]</sup>。以青藓科和羽藓科为代表且与郁闭度

呈负相关、光照呈正相关的物种可能是先锋种类,在群落构建和演替过程中有重要作用。此外,温度<sup>[45]</sup>、基质<sup>[33]</sup>和人为干扰<sup>[23]</sup>对苔藓植物群丛的分布也有影响,这将决定湿地公园苔藓植物群落未来分布格局的变化,在后续的研究中可以考虑更多不同类型的环境因子,以便更深入地理解该区域湿地植物群落的构建与维持机制。

综上,贵阳市 3 个湿地公园中的苔藓植物以藓类植物为主,从藓科、灰藓科和青藓科占主要优势,3 个公园物种多样性的相似性较高,生境类型主要为石生与树生,绝大部分物种的生活型以交织型和丛集型为主。苔藓植物群丛类型可以分为 13 类,且都有各自的物种组成和群落特征,反映了群丛类型与环境之间的关系。海拔、空气湿度、郁闭度和光照共同影响湿地公园的苔藓群丛分布,3 个湿地公园的影响因子存在差异。湿地植物群落构建需要综合考虑生境条件和环境因子等各类因素,研究可为湿地公园苔藓植物的后期研究提供参考资料,为生物多样性保护提供科学依据。

## 参考文献

- [1] SHEN S Q, LI G B. Explore the role of wetlands in the ecosystem [J]. *Agric Technol*, 2019, 39(23): 124–126. [沈圣齐, 李贵波. 探究湿地在生态系统中的作用 [J]. *农业与技术*, 2019, 39(23): 124–126. doi: 10.19754/j.nyyjs.20191215051.]
- [2] XIAO T, SHI Q S, WEN Y, et al. Progress and perspectives in the research of wetland ecosystem services [J]. *Chin J Ecol*, 2022, 41(6): 1205–1212. [肖涛, 石强胜, 闻熠, 等. 湿地生态系统服务研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1205–1212. doi: 10.13292/j.1000-4890.202205.013.]
- [3] CONG C L, LIU T L, ZHANG X Q. Influence of drought stress and rehydration on moisture and photosynthetic physiological changes in three epilithic moss species in areas of karst rocky desertification [J]. *Chemistry*, 2021, 2021: 4944012. doi: 10.1155/2021/4944012.
- [4] JIA S H, ZHANG Z H. Diversity of the bryophytes and their roles in soil and water conservation in karst city rocky desertification [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2014, 21(2): 100–105. [贾少华, 张朝晖. 喀斯特城市石漠苔藓植物多样性及水土保持 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 100–105. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.02.019.]
- [5] ZHU R L, MA X Y, CAO C, et al. Advances in research on bryophyte diversity in China [J]. *Biodiv Sci*, 2022, 30(7): 22378. [朱瑞良, 马晓英, 曹畅, 等. 中国苔藓植物多样性研究进展 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(7): 22378. doi: 10.17520/biods.2022378.]
- [6] TRUJILLO-GONZÁLEZ J M, ZAPATA-MUÑOZ Y L, TORRES-MORA M A, et al. Assessment of urban environmental quality through the measurement of lead in bryophytes: Case study in a medium-sized city [J]. *Environ Geochem Health*, 2020, 42(10): 3131–3139. doi: 10.1007/s10653-020-00548-9.
- [7] LIU Y, PI C Y, TIAN S. Relationships between characteristics of ground bryophyte communities and environmental factors in urban area of Chongqing, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26(10): 3145–3152. [刘艳, 皮春燕, 田尚. 重庆主城区地面苔藓植物群落特征及其与环境的关系 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3145–3152. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150921.001.]
- [8] CHEN Y, FENG J W, NIU S, et al. Numerical classification, ordination, and species diversity of bryophytes along elevation gradients in Xiaoqinling [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(8): 2653–2664. [陈云, 冯佳伟, 牛帅, 等. 小秦岭自然保护区苔藓植物群落数量分类、排序及多样性垂直格局 [J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2653–2664. doi: 10.5846/stxb.201512242568.]
- [9] LIU G, WANG X R. Bryophyte diversity and environmental response in university campuses in karst mountainous regions: A case study of Guizhou University [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2022, 51(3): 198–206. [刘果, 王秀荣. 喀斯特山地高校苔藓植物多样性及环境响应——以贵州大学为例 [J]. *亚热带植物科学*, 2022, 51(3): 198–206. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2022.03.006.]
- [10] JI Y, ZHANG Z H. Analysis of bryophytes diversity features in various successional stages of a karst rocky desertification ecosystem [J]. *Plant Sci J*, 2014, 32(6): 577–585. [籍焯, 张朝晖. 喀斯特石漠生态系统不同自然演替阶段中苔藓植物多样性特征分析 [J]. *植物科学学报*, 2014, 32(6): 577–585. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2014.60577.]
- [11] TIAN Y, ZHAO Z W, LIU Y. Classification and ordination of bryophyte communities in alpine meadow of eastern Xizang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(2): 755–765. [田悦, 赵正武, 刘艳. 西藏东部高寒草甸苔藓植物群落数量分类与排序 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 755–765. doi: 10.5846/stxb202012183215.]
- [12] CAI Q Y, WANG B Z, SHI W, et al. Flora and distribution of bryophytes in Poyang Lake wetland [J]. *Wetland Sci*, 2016, 14(5): 665–670. [蔡奇英, 王保忠, 石伟, 等. 鄱阳湖湿地苔藓植物区系及分布 [J]. *湿地科学*, 2016, 14(5): 665–670. doi: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2016.05.010.]
- [13] LI T T, JIANG Y, DENG X Y, et al. Investigation on species and communities of Bryophytes in Fuquan Chahe National Wetland Park [J]. *J Green Sci Technol*, 2022, 24(3): 95–99. [李婷婷, 蒋娅, 邓欣妍, 等. 福泉岔河国家湿地公园苔藓植物种类与群落调查 [J]. *绿色科技*, 2022, 24(3): 95–99. doi: 10.16663/j.cnki.lskj.2022.03.027.]

- [14] JI M C, MIAO L H, JIANG Y P, et al. Investigation on species and communities of bryophytes in Xixi Wetlands, Hangzhou [J]. *Wetland Sci*, 2015, 13(3): 299–305. [季梦成, 缪丽华, 蒋跃平, 等. 杭州西溪湿地苔藓植物种类与群落调查 [J]. *湿地科学*, 2015, 13(3): 299–305. doi: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2015.03.005.]
- [15] ZHOU X P, TANG L Y, XIA H X, et al. Bryoflora characteristics in Niangniang Mountain National Wetland Park, Liupanshui, Guizhou [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2022, 30(1): 111–124. [周徐平, 唐录艳, 夏红霞, 等. 六盘水娘娘山国家湿地公园的苔藓植物区系特点 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(1): 111–124. doi: 10.11926/jtsb.4414.]
- [16] SU Q. Restructuring and optimization of national wetland parks in urban built-up areas: A case study of Guiyang Ahahu National Wetland Park [J]. *Wetland Sci Manag*, 2022, 18(1): 37–41. [苏琴. 城市建成区内国家湿地公园调整探析: 以贵阳阿哈湖国家湿地公园为例 [J]. *湿地科学与管理*, 2022, 18(1): 37–41. doi: 10.3969/j.issn.1673-3290.2022.01.08.]
- [17] DENG L B, YAN W, WANG G Q. The study on the flora of the vascular bundle plants of the Lake-AHA wetland park in Guiyang [J]. *J Guizhou Norm Univ (Nat Sci)*, 2014, 32(1): 6–9. [邓立斌, 颜伟, 汪贵庆. 贵州贵阳阿哈湖国家湿地公园维管植物区系初步研究 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(1): 6–9. doi: 10.16614/j.cnki.issn1004-5570.2014.01.009.]
- [18] WU Y. Study on bryophyte landscape characteristics and landscape suitability in Guiyang Wetland Park [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. [吴优. 贵阳市湿地公园苔藓植物景观特征及其景观适宜性研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.]
- [19] HUO B B, SUN Z M, OU W H, et al. Environmental filtering and dispersal limitation jointly affect wetland plant community assembly in Hubei section of the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, 43(5): 1804–1811. [霍兵兵, 孙哲明, 欧文慧, 等. 环境筛选和扩散限制对长江流域湖北段湿地植物群落构建的共同影响 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1804–1811. doi: 10.5846/stxb202201110110.]
- [20] GUO K, LIU C C, XIE Z Q, et al. China vegetation classification: Concept, approach and applications [J]. *Phytocoenologia*, 2018, 48(2): 113–120. doi: 10.1127/phyto/2017/0166.
- [21] FENG H J, AN J, YANG G B, et al. Air anion concentration and influencing factors of plant community in urban wetland park: A case study of Huaxi Shilihetan National Urban Wetland Park [J]. *Environ Chem*, 2023, 42(10): 3487–3499. [冯慧君, 安静, 杨广斌, 等. 城市湿地公园植物群落空气负离子浓度及影响因素——以花溪十里河滩国家城市湿地公园为例 [J]. *环境化学*, 2023, 42(10): 3487–3499. doi: 10.7524/j.issn.0254-6108.2022092405.]
- [22] LI T T, HOU M D, DENG X Y, et al. Diversity of epiphytic bryophytes for four vegetation types in Guizhou Xishui National Nature Reserve [J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, 31(8): 1556–1565. [李婷婷, 侯梦丹, 邓欣妍, 等. 贵州习水国家级自然保护区 4 种植被类型树附生苔藓植物多样性研究 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1556–1565. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.08.007.]
- [23] YANG Q, PU H M, ZHAO X C, et al. Comparison of different plant cover investigation methods for three artificial grasslands [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, 27(1): 220–227. [杨琴, 蒲红梅, 赵学春, 等. 3 种人工草地不同植被覆盖度实地测量方法比较 [J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(1): 220–227. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.01045.]
- [24] TUMUR ANWAR, ILGHAR WINIRA, SULAYMAN MAMTIMIN. Diversity and distribution of bryophytes and their relationship with environmental factors in Urumqi [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2023, 37(8): 137–144. [艾尼瓦尔·吐米尔, 维尼拉·伊利哈尔, 买买提明·苏来曼. 乌鲁木齐市苔藓植物多样性和分布及与环境因子的关系 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(8): 137–144. doi: 10.13448/j.cnki.Jalre.2023.194.]
- [25] XIONG Y X. Illustrations of Bryophytes in Guizhou of China [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2011. [熊源新. 贵州苔藓植物图志(习见种卷) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011.]
- [26] XIONG Y X. Bryophytes in Guizhou, Vol. 2 [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2018. [熊源新. 贵州苔藓植物志, 第 2 卷 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2018.]
- [27] XIONG Y X. Bryophytes in Guizhou, Vol. 1 [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2018. [熊源新. 贵州苔藓植物志, 第 1 卷 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2018.]
- [28] MÄGDEFRAU K. Life-forms of bryophytes [M]. *Bryophyte Ecology*. Dordrecht: Springer, 1982: 45–58. doi: 10.1007/978-94-009-5891-3\_2.
- [29] LIU Y, CAO T, WANG J, et al. Relationships between distribution of soil-born bryophytes in urban area of Hangzhou and related ecological factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(4): 775–781. [刘艳, 曹同, 王剑, 等. 杭州市区土生苔藓植物分布与生态因子的关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 775–781. doi: 10.13287/j.1001-9332.2008.0192.]
- [30] Chinese Academy of Sciences Biodiversity Committee. Principles and Methods of Biodiversity Research [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1994. [中国科学院生物多样性委员会. 生物多样性研究的原理与方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.]
- [31] HILL M A. TWINSpan: A FORTRAN Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-Way Table by Classification of the Individuals and Attributes [M]. New York: Cornell University Press, 1979: 1–90.
- [32] LI G Q, WANG X A, GUO H, et al. Effects of ecological factors on

- plant communities of Ziwuling Mountain, Shaanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(6): 2463–2471. [李国庆, 王孝安, 郭华, 等. 陕西子午岭生态因素对植物群落的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2463–2471.]
- [33] GUO L, WEI B L, HU J T, et al. Ecological niche of bryophytes based on two resource axes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(21): 7266–7276. [郭磊, 韦博良, 胡金涛, 等. 基于两个不同资源轴上苔藓植物生态位分析 [J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7266–7276. doi: 10.5846/stxb201608101638.]
- [34] COELHO M C M, GABRIEL R, HESPAHOL H, et al. Bryophyte diversity along an elevational gradient on Pico Island (Azores, Portugal) [J]. *Diversity*, 2021, 13(4): 162. doi: 10.3390/d13040162.
- [35] GULNIGAR AYSIRAHUN, TURGUN NURDIN, DILNUR ALAYI-DIN, et al. Research on bryophyte community type in Tomur Peak National Natural Reserve [J]. *J C China Norm Univ (Nat Sci)*, 2019, 53(4): 534–541. [吉丽尼孜尔·艾依斯热洪, 吐尔洪·努尔东, 迪丽努尔·阿拉依丁, 等. 托木尔峰国家级保护区苔藓植物生态群落调查 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 53(4): 534–541. doi: 10.19603/j.cnki.1000-1190.2019.04.013.]
- [36] FAN X Y, LIU W Y, SONG L, et al. Life-form composition and water characteristics of terrestrial, bole and branch epiphytic bryophytes in a moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains [J]. *Guihaia*, 2019, 39(5): 668–680. [范晓阳, 刘文耀, 宋亮, 等. 哀牢山湿性常绿阔叶林地生、树干及树枝附生苔藓生活型组成及其水分特性 [J]. *广西植物*, 2019, 39(5): 668–680. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201805014.]
- [37] VITTOZ P, CAMENISCH M, MAYOR R, et al. Subalpine-nival gradient of species richness for vascular plants, bryophytes and lichens in the Swiss Inner Alps [J]. *Bot Helv*, 2010, 120(2): 139–149. doi: 10.1007/s00035-010-0079-8.
- [38] ZHOU X L, XU W, WEN Z, et al. Relationship between Nitrogen Concentrations in *Haplocladium microphyllum* and measured atmospheric nitrogen deposition [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2021, 40(6): 36–41. [周晓丽, 许稳, 温章, 等. 细叶小羽藓体内含氮量与大气氮沉降对应关系的研究 [J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(6): 36–41. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2021.06.007.]
- [39] MA H P, ZHENG W L, SHI Y L, et al. Relationship between the moss and environment in Sygera Mountains of Xizang, China [J]. *J Plateau Agric*, 2019, 3(3): 231–238. [马和平, 郑维列, 石玉龙, 等. 西藏色季拉山藓类植物与环境关系的研究 [J]. *高原农业*, 2019, 3(3): 231–238. doi: 10.19707/j.cnki.jpa.2019.03.001.]
- [40] SILVA J B, GERMANO S R, MACIEL-SILVA A S, et al. A small elevational gradient shows negative bottom-to-top bryophyte richness in a seasonally dry forest in Brazil [J]. *Cryptog Bryol*, 2019, 40(17): 219–231. doi: 10.5252/cryptogamie-bryologie2019v40a17.
- [41] GARCÍA E L, ROSENSTIEL T N, GRAVES C, et al. Distribution drivers and physiological responses in geothermal bryophyte communities [J]. *Am J Bot*, 2016, 103(4): 625–634. doi: 10.3732/ajb.1500422.
- [42] BATKE S P, MURPHY B R, HILL N, et al. Can air humidity and temperature regimes within cloud forest canopies be predicted from bryophyte and lichen cover? [J]. *Ecol Indic*, 2015, 56: 1–5. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.03.022.
- [43] WANG P, WEI H, CHEN M Y, et al. Effect of restoration methods on species composition of bryophytes in karst habitats [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2023, 31(5): 705–714. [汪鹏, 魏虹, 陈明月, 等. 生态恢复方式对喀斯特生境苔藓植物物种组成的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(5): 705–714. doi: 10.11926/jtsb.4636.]
- [44] MÁRIALIGETI S, NÉMETH B, TINYA F, et al. The effects of stand structure on ground-floor bryophyte assemblages in temperate mixed forests [J]. *Biodivers Conserv*, 2009, 18(8): 2223–2241. doi: 10.1007/s10531-009-9586-6.
- [45] ZHANG Y L, HE N P, LIU Y. Temperature factors are a primary driver of the forest bryophyte diversity and distribution in the southeast Qinghai-Xizang Plateau [J]. *For Ecol Manag*, 2023, 527: 120610. doi: 10.1016/j.foreco.2022.120610.