

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201704003

引文格式: 吴昊天, 徐双双, 杨世勇, 等. 岩溶穴居性陆氏石山苣苔群落物种组成与生态位分析研究 [J]. 广西植物, 2017, 37(10):1240-1249
WU HT, XU SS, YANG SY, et al. Species composition, community structure and population niche of the karst cave-dwelling *Petrocodon lui* [J].
Guihaia, 2017, 37(10):1240-1249

岩溶穴居性陆氏石山苣苔群落物种组成与生态位分析研究

吴昊天^{1,2}, 徐双双¹, 杨世勇¹, 符龙飞², 韦毅刚², 温放^{2*}

(1. 安徽师范大学 生命科学学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 中国苦苣苔科植物保育中心, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学
重点实验室, 桂林植物园, 广西壮族自治区 广西植物研究所, 广西 桂林 541006)
中国科学院

摘要: 根据对陆氏石山苣苔模式产地的实地调查与取样, 采用定量分析的方法, 研究了其模式产地草本植物群落中重要值排名前 20 的物种优势度、生态位宽度、生态位重叠值以及环境土壤肥力值。结果表明: (1) 陆氏石山苣苔在其模式产地中具有明显的优势度, 且在 Levins、Hurlbert 生态位宽度指数测度下均排位第二, 表明对原生环境中资源的利用程度高, 但 Pianka 生态位重叠显示当产生竞争关系时陆氏石山苣苔总是处于竞争劣势, 竞争能力薄弱。(2) 岩溶洞穴环境中不同空间上的环境资源存在明显差异, 导致物种间的生态位重叠值与种间关系的复杂性, 需依据物种的生物学特性和对环境的需求进行区别研究。(3) 陆氏石山苣苔模式产地的资源环境因素彼此之间存在一定的相互关系, 这构成了一种保护机制, 从而缓解了陆氏石山苣苔因其自身竞争力薄弱产生的生存压力, 建议后期工作中应优先加强对其环境的保护。

关键词: 陆氏石山苣苔, 岩溶洞穴, 种群生态位, 土壤肥力, 环境保护

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)10-1240-10

Species composition, community structure and population niche of the karst cave-dwelling *Petrocodon lui*

WU Hao-Tian^{1,2}, XU Shuang-Shuang¹, YANG Shi-Yong¹,
FU Long-Fei², WEI Yi-Gang², WEN Fang^{2*}

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 2. Gesneriad Conservation Center of China (GCCC),
Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guilin Botanical Garden, Guangxi Institute of
Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China)

收稿日期: 2017-08-29 修回日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(31260038, 31460159); 安徽师范大学研究生科研创新与实践项目(2016yks073); 广西科学院基本业务
费项目(2017YJJ23022); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室项目(16-A-01-01, 16-A-01-02) [Supported by the National
Natural Science Foundation of China (31260038, 31460159); Postgraduate Research Innovation and Practice Program of Anhui Normal Uni-
versity (2016yks073); Fundamental Research Fund of Guangxi Academy of Sciences (2017YJJ23022); Guangxi Key Laboratory of Plant
Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (16-A-01-01, 16-A-01-02)].

作者简介: 吴昊天(1990-), 男, 安徽合肥人, 硕士, 主要研究方向为植物生理生态学, (E-mail) 18255320080@126.com。

* **通信作者:** 温放, 博士, 副研究员, 主要从事观赏植物种质资源与育种以及珍稀濒危植物保育的研究, (E-mail) wenfang760608@139.com。

Abstract: Based on the data collected from the plots investigation along with the implementation Levins, Hurlbert and niche overlap formulas, this paper investigated the niche breadth values and niche overlap values of the main herbaceous species were measured in the type locality of *Petrocodon lui* and soil fertility values in the native environments. The results were as follows: (1) *Pet. lui* had a higher important value in their habitats. It was ranked the second in the Levins and Hurlbert niche breadth index. But the Pianka niche overlap showed that when a competitive relationship occurred, *Pet. lui* was always at a competitive disadvantage. The above showed that it had a high degree of utilization of resources in the native environment, but the competitive ability was weak. (2) There were significant differences in the environmental resources of different spaces in the karst cave environment. This led to the complexity of the niche overlap value and the interspecific relationship. Hence the need for research based on the difference between the biological characteristics of the species and the needs of the environment. (3) There were certain relations between differently ecological factors and resource availability in the type locality of *Pet. lui*. Because of the very weak competitiveness of *Pet. lui* with its accompanying plant species, this mechanism provides some protection to alleviate the pressure on struggling. Therefore, we should make it a priority to protect the natural habitat in our later work.

Key words: *Petrocodon lui*, karst cave, population niche, soil fertility, environmental protection

极小种群野生植物(plant species with extremely small populations)是指分布地域狭窄或呈间断分布,受到各类因素影响,呈现出种群退化和数量持续减少,种群及个体数量都极少,已经低于稳定存活界限的最小生存种群(minimum viable population,简称MVP),而随时濒临灭绝的野生植物(Ma et al, 2013)。陆氏石山苣苔[*Petrocodon lui* (Yan Liu & W. B. Xu) A. Weber & Mich. Möller]原发表为陆氏细筒苣苔(*Lagarosolen lui* Yan Liu & W. B. Xu) (XU, 2010), Weber et al(2011)根据分子和形态学的证据将其并入石山苣苔属(*Petrocodon* Hance),而原狭义石山苣苔属也由我国特有的小属(原仅含3种1变种)被扩大为一个小属(33种1变种)。我国西南至华南的石灰岩地段为石山苣苔属植物现代分化中心,向北拓展到华中(湖北),向东延伸至华东(福建、江西),向南抵达中南半岛北缘(越南北部和泰国北部)(Weber et al, 2011; Middleton et al, 2015; Möller et al, 2016)。广义石山苣苔属植物属下变异丰富,分化剧烈,极具科研价值,但区域化分布特别严重,其中相当多一部分类群以岩溶洞穴(Karst Cave)作为生存单位。近些年来由于自然和人为的因素,很多种类都濒危灭绝,成为极小种群野生植物(PSESP)。例如,近年来发表的一些穴居性的洞穴植物新分类群,如广西石山苣苔[*Petrocodon guangxiensis* (Yan Liu & W. B. Xu) W. B. Xu & K. F. Chung](Liu et al, 2010)、靖西石

山苣苔[*Pet. jingxiensis* (Yan Liu, H. S. Gao & W. B. Xu) A. Weber & Mich. Möller](许为斌等, 2008; Weber et al, 2011)、全缘叶石山苣苔[*Pet. integrifolius* (D. Fang & L. Zeng) A. Weber & Mich. Möller]等(方鼎等, 1993; Weber et al, 2011),未在其模式产地外的地方发现。由于局限分布在一个或几个岩溶洞穴中,它们的绝对数量常远低于世界公认的“最小可存活种群(MVP)”规模。

综合上述情况,由于研究对象野外生存情况与数量的制约,常规破坏性的实验方法无法适用于极小种群野生植物的研究,所以在对野外濒危植物生存现状进行评价时会引入生态位(宋永昌, 2001)这一概念。生态位就其本质来说,是物种在特定尺度下特定环境中的功能单位,包括物种对环境的要求和环境对物种的影响两个方面及其规律等范畴,是物种属性的特征表现,可定量地反映物种与生境的相互作用关系(Hurlbert, 1978; Leibold, 1995)。通过对物种优势种群生态位的研究,不仅可以了解种群对资源的利用情况,还有助于掌握物种的竞争机制和规律,现在生态位理论已成为解释自然群落中物种共存与竞争机制的基本理论之一,近年来运用生态位理论研究珍稀濒危植物也逐渐受到重视(魏志琴等, 2004; 林大影等, 2007; 王玉兵等, 2015),但有关穴居性石山苣苔属植物的种群生态位研究尚未见报道。因此,本研究从陆氏石山苣苔自身环境适应与竞争能力的角度切入,在不破坏现有种群结

构与数量的基础上,对陆氏石山苣苔群落及其伴生的优势种群对可利用资源的分享状况以及种间关系进行探究,分析其潜在的濒危机制并为后续的解濒措施制定奠定基础,进一步开展后期保护策略制定和种群复壮、种群回归和物种解濒试验乃至本属内及苦苣苔科植物的濒危类群研究提供科学依据,同时还能够将生态位理论运用于岩溶穴居性极小种群野生植物的研究提供范例。

1 研究地概况

研究地点位于广西壮族自治区靖西市境内的古龙山峡谷风景区,地理坐标为 $22^{\circ}50' \sim 23^{\circ}20' N$ 、 $106^{\circ}30' \sim 106^{\circ}50' E$,总面积为 296.75 km^2 。景区属北热带山地气候,气候温和,年平均气温为 $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$,1 月份平均气温为 $13.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,累年极端低温极值为 $-0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,7 月份平均气温为 $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$,极端高温为 $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年降水量为 1631 mm ,4—9 月为雨季,占全年降水量在 85% 以上。地域位于古生代的石灰岩地层,海拔大多在 $500 \sim 800 \text{ m}$ 之间,最低海拔为 264.5 m ,属中山地貌。景区内植物资源丰富,现有森林 351.5 hm^2 ,灌木林 431.6 hm^2 ,森林覆盖率达 65.76%。各种动植物约 800 种,中间不少属于国家保护的珍稀动植物,如桫欏等。

陆氏石山苣苔在谷内有多处分布点,但形成群落的仅有一处,即位于峡谷中段一个洞穴内的模式产地(本次研究地点)。洞穴洞口向北偏西 78° ,洞口高约 7 m 、宽约 8 m ,邻接一条峡谷河流,与景区栈道隔河相望,使其在空间上形成一种隔离。模式产地的洞穴内没有乔木。由于陆氏石山苣苔为典型的岩生植物,主要在岩壁上呈附着生长,因此群落内的物种主要为与陆氏石山苣苔共生的、可以附着于岩壁上生长的植物类群,在这一狭小的区域内优势物种是陆氏石山苣苔,但其所处的群落主要由陆氏石山苣苔—尾花细辛—日本蛇根草组成。不过虽然处于原生态自然公园内且属于峡谷景区栈道的对侧,游客对其影响甚微,但其位于峡谷一个拐点且属于凹陷性小洞穴,如同是一个天然的避雨场所,在修建景区的初期应是囤放建筑材料的场地,所以仅有的平地基本已被建筑沙子覆盖,但陆氏石山苣苔绝大多数的居群是附生于洞穴内外的石

壁生长,因此并未对其造成很大的影响。

2 研究方法

2.1 生态位样方的选择、调查与分析

2.1.1 样方选择与调查 以陆氏石山苣苔分布的洞穴为主要对象,按照水平和垂直的位置关系将洞穴由内至外划分为 6 个部分(洞穴深处石壁 S1,洞穴口弱光处石壁 S2,洞穴口强光处石壁 S3,洞穴内平地 S4,洞穴口外层石壁 S5,距洞口 5 m 处无人干扰的石壁 S6),每个部分随机设置面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方 5 个,共计小样方 30 个。调查记录样方中植物的种类、个体数、高度范围和盖度等。

2.1.2 生态位测度与分析 (1)重要值测定:根据样方调查资料计算每种植物的重要值(张金屯,2011)。计算公式:

$$\text{重要值} = \frac{\text{相对盖度} + \text{相对频度} + \text{相对高度}}{3}$$

式中,相对盖度 = 该种植物的盖度/所以植物的盖度之和 $\times 100\%$,相对频度 = 该种植物的个体数/全部植物的总个体数 $\times 100\%$,相对高度 = 该种植物的高度之和/全部植物高度之和 $\times 100\%$

(2)生态位宽度:本研究采用的生态位宽度测定方法分别是生态学中经典 Levins 生态位宽度 B_i (Levins, 1968)和 Hurlbert 生态位宽度 B_a (Hurlbert, 1978),测定生态位宽度。

Levins 生态位宽度指数公式:

$$B_i = - \sum_{j=1}^r P_{ij} \log P_{ij}$$

式中, B_i 是种 i 的生态位宽度, P_{ij} 是种 i 对第 j 个资源的利用占它对全部资源利用的频度,即 $P_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_i}$,而 $N_i = \sum_{j=1}^r n_{ij}$, n_{ij} 为种 i 在资源 j 上的优势度,即物种的重要值, r 为资源等级数,即表 2 中 S1~6 分布的 6 个样地数,上述方程具有值域 $[0, \log r]$ 。

$$\text{Hurlbert 生态位宽度指数公式: } B_a = \frac{B_i - 1}{r - 1}$$

式中, $B_i = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2$, B_a 为种 i 的生态位宽度, P_{ij} 和 r 的含义同上式,该方程的值域为 $[0, 1]$ 。

(3)生态位重叠:生态位重叠是指一定资源序列上,两个物种利用同等级资源而相互重叠的情况

(王伯荪,1987),采用 Pianka 生态位重叠公式计算生态位重叠(Pianka,2003):

$$O_{ik} = \frac{\sum n_{ij} \times n_{kj}}{\sqrt{\sum n_{ij}^2 \times \sum n_{kj}^2}}$$

式中, O_{ik} 为生态位重叠值, n_{ij} 和 n_{kj} 为种*i*和种*k*在资源*j*上的优势度,即样方中物种的重要值。

2.2 土壤肥力的测定与分析

2.2.1 土壤肥力测定 土壤电导率(EC)体现的是土壤的电化学性,在非盐渍化地区,该特性与土壤营养成分含量密切相关,使用电导率特征可以了解研究对象的土壤肥力综合指标值,评价土壤肥力水平(周红艺等,2003)。为真实地反映自然环境下土壤的肥力情况,采集洞穴内外不同位置的表层土样(厚度 ≤ 1 cm)各 150 g,包括目标物种大量分布的岩壁土、稀少分布的壁地交界土壤和个别分布的洞内平地土等,并在实验室中称取等量中性通用营养土,通过 EC 探头测定电导率法(邓良基等,2007)测定陆氏石山苣苔生境中不同位置上的表层土壤以及通用营养土的电导率以表示土壤肥力值(仪器使用含有四颗 EC 探头的小米 01HHCC 型便携式肥力监测仪)(赵玉成等,2013;陈玲等,2009;王琦等,2003)。

2.2.2 数据分析 对测得的数据用 Excel2013 进行统计后,采用 SPSS22.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(Duncan 法)。

3 结果与分析

3.1 陆氏石山苣苔模式产地优势物种的结构特征

根据样方选取调查和统计结果显示,陆氏石山苣苔模式产地中一共记录到草本植物 34 种,其中前 20 位优势植物物种的特征值如表 1 所示,可见陆氏石山苣苔在其模式产地中占据绝对优势的地位,在中草本层对洞穴的覆盖率达到 36.86%,优势程度达到 37%。

由于优势度(Dominants)在各个学者间理解存在差异,所以这里用重要值(Important value)来阐述物种的综合数量指标,表征物种在群落中的地位和作用,反映物种在群落中的优势程度(张金屯,2011)。从表 2 可以看出,陆氏石山苣苔在洞穴内外的石壁上占据重要优势,其重要值最大,但在洞穴内平地其优势度大幅度下降,可见生长的土壤环境对其分布产

生了一定的影响。不过在其模式产地的洞穴中,它仍和日本蛇根草、多枝铁角蕨以及中越秋海棠等构成洞穴植物草本层的主要优势种群。

3.2 优势种群生态位宽度分析

生态位宽度是衡量物种种群对环境资源利用能力的尺度,能够较好地解释群落演替过程中种群的环境适应性和资源利用能力,通常生态位宽度越大,表明物种对环境的适应能力越强(Weider,1993;张金屯,2011)。本研究在对陆氏石山苣苔模式产地的洞穴研究中,采用 Levins 生态位宽度指数和 Hurlbert 生态位宽度指数两种计算方式对资源中优势物种的生态位宽度进行测定,按照研究环境下总重要值进行排序,得到结果如表 3 所示,按 Levins 生态位宽度 B_i 大小和 Hurlbert 生态位宽度 B_n 大小前 5 位均依次为显脉楼梯草、陆氏石山苣苔、红鳞肋毛蕨、铁线蕨和贯众属 1 种。可见,虽然两种测定结果略有差别,但趋势基本一致,结合实地调查的内容可以发现,生态位宽度较大的物种大多对阳光、温度、湿度和土壤环境的要求不高,只要空间条件充足均可生存,例如:陆氏石山苣苔、蔓出卷柏、铁线蕨、红鳞肋毛蕨等,它们对该洞穴环境的空间资源利用程度较高。而当上述环境资源条件的一条或多条达到满足时,一些物种则表现出较强的竞争性,如日本蛇根草、野线麻和异药花等,它们在光照充足或土壤相对肥沃的区域(如平地)中数量、盖度和优势度明显高于其它位置。此项结果也充分的反映出陆氏石山苣苔在其环境空间中具有高度的适应性。

3.3 生态位重叠分析

生态位重叠是指两个(或两个以上)种群在生态因子利用上具有一定的相似性,当它们生活于同一空间时分享或竞争共同资源的现象(王伯荪和彭少麟,1997)。在对研究环境下前 20 位优势种群的生态位重叠值进行计算后得到表 4 的统计结果,其中生态位重叠值 ≥ 0.5 的有 82 对,占总对数的 43.16%,而生态位重叠值 ≥ 0.7 的有 39 对,占总对数的 20.53%,可见研究环境中优势种群间生态位重叠度水平较高。生态位宽度均排在前 5 位的显脉楼梯草、陆氏石山苣苔、红鳞肋毛蕨、铁线蕨以及贯众属一种之间的生态位重叠值范围在 0.44~0.93,可见生态位宽度大的种群间生态位重叠值也相应较高,

表 1 陆氏石山苣苔模式产地 20 个优势种的主要特征值

Table 1 Main characteristic values of 20 dominant species in the type locality of *Petrocodon lui*

序号 No.	植物名称 Name of plant species	平均高度 Average height (cm)	数量 Quantity	相对盖度 Relative coverage (%)	重要值 Important value (%)
1	陆氏石山苣苔 <i>Petrocodon lui</i>	7.69	2608	36.86	37.28
2	日本蛇根草 <i>Ophiorrhiza japonica</i>	59.88	270	12.50	12.61
3	多枝铁角蕨 <i>Asplenium cornutissimum</i>	0.58	618	7.32	6.54
4	中越秋海棠 <i>Begonia sinovietnamica</i>	4.88	244	4.26	3.48
5	毛叶轴脉蕨 <i>Ctenitopsis devexa</i>	33.03	87	5.08	3.44
6	野线麻 <i>Boehmeria longispica</i>	27.74	31	3.48	1.71
7	显脉楼梯草 <i>Elatostema longistipulum</i>	9.07	45	3.57	1.65
8	异药花 <i>Fordiophyton faberi</i>	23.70	29	3.10	1.51
9	小铁线蕨 <i>Adiantum mariesii</i>	2.43	71	2.69	1.42
10	蔓出卷柏 <i>Selaginella davidii</i>	0.89	81	1.99	1.21
11	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	16.16	53	1.30	1.13
12	薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>	1.53	73	1.44	0.99
13	红鳞肋毛蕨 <i>Ctenitis rhodolepis</i>	16.82	44	1.19	0.99
14	长梗吊石苣苔 <i>Lysionotus longipedunculatus</i>	38.80	18	1.55	0.92
15	贯众属 1 种 <i>Cyrtomium</i> sp.	8.35	46	0.83	0.73
16	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>	8.27	50	0.68	0.72
17	长柄恋岩花 <i>Echinacanthus longipes</i>	13.31	22	1.04	0.61
18	缘毛胡椒 <i>Piper semiimmersum</i>	2.26	21	1.27	0.58
19	华南胡椒 <i>Piper austrosinense</i>	1.93	27	1.04	0.54
20	禾本科 1 种 <i>Gramineae</i> sp.	69.35	7	0.24	0.32

对相同资源的共享或竞争程度较大。

在以陆氏石山苣苔为研究主体时,有 11 种优势物种与陆氏石山苣苔生态位重叠值大于 0.5(表 4)。结合种群的平均高度、在各样方位的重要值及实际分布情况,除了多枝铁角蕨表现为明显的伴生关系,其余 10 种优势种与陆氏石山苣苔在空间关系上存在分离,仅可分布于土层基质厚于 5 mm 的位置上。而在与显脉楼梯草生态位关系中重叠值最大,其生态位重叠值为 0.928,这与它们之间对环境具有相近的要求有关,存在有明显的竞争关系,不过由于显脉楼梯草的生物学形态使其并不适合长期生长在坡度陡峭的石壁上,所以多分布于坡度缓和的石壁与平地交界处。

在优势度前 5 位的种群相互关系中,陆氏石山苣苔与其他 4 种优势种的生态位重叠值处于 0.25~

0.67 之间,其中与多枝铁角蕨的生态位重叠值为 0.665,对资源的利用关系表现为分享相伴而生,而与日本蛇根草、中越秋海棠和毛叶轴脉蕨的生态位重叠值分别为 0.276、0.495 和 0.495,对资源的利用关系表现为当环境资源条件丰厚时陆氏石山苣苔处于劣势;当环境资源条件贫瘠时陆氏石山苣苔占据优势地位。

综合以上结果表明,陆氏石山苣苔在其模式产地小生境中与其它物种间生态位重叠程度高,但是由于环境资源的限制并不全表现为竞争关系,需根据占用资源的实际情况具体分析。这也反映出陆氏石山苣苔具有较高的环境适应性,但自身竞争能力较弱的特性。

3.4 洞穴土壤肥力性质分析

土壤肥力是反映土壤肥沃性的一个重要指标,

表 2 不同样方位中陆氏石山苣苔及其伴生种的重要值

Table 2 Importance values of *Petrocodon lui* and its accompanying species in different positions

序号 No.	植物名称 Name of plant species	重要值 Important value (%)						总和 Σ (%)
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	
1	陆氏石山苣苔 <i>Petrocodon lui</i>	45.88	79.56	58.69	1.37	67.64	39.06	292.20
2	日本蛇根草 <i>Ophiorrhiza japonica</i>	—	—	—	17.49	—	46.80	64.28
3	多枝铁角蕨 <i>Asplenium cornutissimum</i>	10.89	4.95	14.77	5.61	—	—	36.22
4	中越秋海棠 <i>Begonia sinovietnamica</i>	24.37	6.82	0.33	0.62	—	—	32.14
5	毛叶轴脉蕨 <i>Ctenitopsis devexa</i>	—	—	6.18	4.63	0.79	7.63	19.23
6	显脉楼梯草 <i>Elatostema longistipulum</i>	2.74	1.70	2.63	0.67	2.71	0.85	11.30
7	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	—	—	0.74	—	7.73	0.96	9.42
8	野线麻 <i>Boehmeria longispica</i>	3.14	—	2.88	3.12	—	—	9.15
9	蔓出卷柏 <i>Selaginella davidii</i>	5.17	—	—	1.34	0.95	0.47	7.93
10	小铁线蕨 <i>Adiantum mariesii</i>	—	0.22	6.22	—	1.26	—	7.70
11	长梗吊石苣苔 <i>Lysionotus longipedunculatus</i>	—	—	1.56	0.95	3.64	—	6.15
12	异药花 <i>Fordiophyton faberi</i>	0.38	—	—	5.53	—	—	5.91
13	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>	2.09	1.63	0.29	0.42	0.31	1.15	5.91
14	红鳞肋毛蕨 <i>Ctenitis rhodolepis</i>	0.67	0.67	0.10	1.91	0.75	1.27	5.39
15	薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>	—	1.24	—	3.16	—	0.34	4.74
16	长柄恋岩花 <i>Echinacanthus longipes</i>	—	—	0.58	—	4.15	—	4.74
17	贯众属 1 种 <i>Cyrtomium</i> sp.	1.28	—	0.18	1.63	0.59	0.54	4.22
18	缘毛胡椒 <i>Piper semiimmersum</i>	—	—	1.52	—	2.05	—	3.58
19	禾本科 1 种 Gramineae sp.	—	—	0.30	—	2.90	—	3.20
20	华南胡椒 <i>Piper austrosinense</i>	1.47	0.44	0.37	0.82	—	—	3.10

注：各样方位号代表的位置：S1. 洞穴深处石壁；S2. 洞穴口弱光处石壁；S3. 洞穴口强光处石壁；S4. 洞穴内平地；S5. 洞穴口外层石壁；S6. 距洞口 5 m 处无人干扰的石壁；“—”表示该物种在此大样方中未分布。

Note: Samples of the serial number indicate the location: S1. Depths of the cave walls; S2. Cave wall of the weak light band; S3. Cave wall of the strong light band; S4. Ground inside the cave; S5. Outer wall of the cave; S6. Stone wall from the cave mouth 5 m; “—” Indicates that the species is not distributed in this quadrat.

它是土壤各种基本性质的综合表现。除了物种自身的因素，环境中土壤条件的限制可能是造成种群

分布不均的重要外界因素。为真实反映自然环境下土壤的肥力情况，对陆氏石山苣苔洞穴生境中不

表 3 陆氏石山苣苔模式产地优势物种
的生态位宽度指数

Table 3 Niche breadth of dominant population
in the type locality of *Petrocodon lui*

序号 No.	植物名称 Name of plant species	Levins 生态 位宽度指数 Levins niche breadth index (B_i)	Hurlbert 生态 位宽度指数 Hurlbert niche breadth index (B_a)
1	陆氏石山苣苔 <i>Petrocodon lui</i>	0.695	0.750
2	日本蛇根草 <i>Ophiorrhiza japonica</i>	0.254	0.131
3	多枝铁角蕨 <i>Asplenium cornutissimum</i>	0.559	0.468
4	中越秋海棠 <i>Begonia sinovietnamica</i>	0.287	0.122
5	毛叶轴脉蕨 <i>Ctenitopsis devexa</i>	0.524	0.424
6	显脉楼梯草 <i>Elatostema longistipulum</i>	0.726	0.788
7	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	0.258	0.090
8	野线麻 <i>Boehmeria longispica</i>	0.477	0.399
9	蔓出卷柏 <i>Selaginella davidii</i>	0.435	0.224
10	小铁线蕨 <i>Adiantum mariesii</i>	0.248	0.094
11	长梗吊石苣苔 <i>Lysionotus longipedunculatus</i>	0.411	0.256
12	异药花 <i>Fordiophyton faberi</i>	0.104	0.027
13	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>	0.666	0.598
14	红鳞肋毛蕨 <i>Ctenitis rhodolepis</i>	0.685	0.658
15	薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>	0.352	0.186
16	长柄恋岩花 <i>Echinacanthus longipes</i>	0.162	0.055
17	贯众属 1 种 <i>Cyrtomium</i> sp.	0.608	0.516
18	缘毛胡椒 <i>Piper semiimmersum</i>	0.296	0.191
19	禾本科 1 种 Gramineae sp.	0.135	0.041
20	华南胡椒 <i>Piper austrosinense</i>	0.537	0.408

同位置土壤电导率进行测定,进而反映出土壤肥力情况,结果如图 1 所示。陆氏石山苣苔洞穴生境中内外石壁面附着的土壤肥力值均值在 $100 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$

以下,而且多数位置上土壤覆盖厚度不足 5 mm (采集集中需用小铲轻轻刮取),但陆氏石山苣苔在该类位置上的分布却占其总数量在 90% 以上。在实地调查中发现,随着土壤分布由上至下,土壤肥力值呈现出增长的趋势,物种丰富度也表现为上升趋势,其中平地面的物种丰富度明显高于石壁面,调查中出现的 34 种物种中有 23 种在平地均有分布,所以结合前面的研究可推测,由于平地面丰富的土壤环境衍生出较为激烈的种间竞争关系,从而导致竞争力薄弱的陆氏石山苣苔在平地面中的优势度显著下降。不过由于陆氏石山苣苔洞穴生境平地曾受到人为干扰,仅在一些零星突起的钟乳石块上有个别陆氏石山苣苔植株个体的分布,而在砂石覆盖的平地面则未曾发现任何个体分布,所以当初在景区修建过程中对该洞穴平地面生态系统造成了持续性的破坏,可能在一定程度上影响了陆氏石山苣苔原本分布格局,这有待进一步探讨。

为了表现土壤肥力值的常规水平,我们对市场通用的营养土进行了测量,测量结果均在 $1000 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以上。

以上结果表明,陆氏石山苣苔可在土壤贫瘠的环境中生存。

4 讨论与结论

生态位宽度是度量植物种群对环境资源利用状况的尺度,种群生态位宽度越大,则它对环境的适应能力越强,分布越广泛 (Weider, 1993)。本研究结果表明,陆氏石山苣苔在其模式产地中重要值和生态位宽度水平较高,在生长环境中具有明显的优势地位,对资源的利用也较为充分,突破了洞穴环境下光照以及空间土壤等资源的限制。这也暗示,如果能够很好地保护陆氏石山苣苔的分布地生态环境,将对陆氏石山苣苔的种群保护产生十分明显的作用。这与金俊彦等 (2013)、王立龙等 (2006) 在相关研究中利用生态位测定得出的生境对一些物种在竞争关系中具有保护作用的结论相一致。不过由于研究的主体对象是陆氏石山苣苔本身,而且研究的样本数量有限,所以重要值和生态位宽度结果展示出的高数值量具有一定的特殊性。

当两个或多个物种共同利用同一资源或共同占

表 4 陆氏石山苣苔模式产地优势种群落的生态位重叠值

Table 4 Niche overlap indexes of dominant population in the type locality of *Petrocodon lui*

序号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	0.276	1.000																	
3	0.665	0.099	1.000																
4	0.495	0.009	0.613	1.000															
5	0.494	0.805	0.544	0.018	1.000														
6	0.928	0.202	0.803	0.619	0.506	1.000													
7	0.575	0.115	0.070	0.001	0.211	0.596	1.000												
8	0.448	0.207	0.901	0.594	0.561	0.680	0.051	1.000											
9	0.441	0.168	0.592	0.920	0.178	0.651	0.183	0.710	1.000										
10	0.549	0.000	0.739	0.022	0.571	0.624	0.288	0.534	0.034	1.000									
11	0.621	0.082	0.351	0.011	0.382	0.706	0.919	0.347	0.213	0.552	1.000								
12	0.034	0.349	0.320	0.090	0.424	0.168	0.000	0.630	0.311	0.000	0.233	1.000							
13	0.781	0.416	0.642	0.835	0.399	0.757	0.160	0.560	0.760	0.138	0.165	0.192	1.000						
14	0.555	0.716	0.444	0.337	0.699	0.579	0.350	0.610	0.520	0.105	0.446	0.752	0.656	1.000					
15	0.254	0.419	0.353	0.120	0.464	0.260	0.012	0.547	0.237	0.013	0.216	0.924	0.373	0.824	1.000				
16	0.560	0.000	0.104	0.002	0.151	0.600	0.992	0.076	0.172	0.332	0.938	0.000	0.117	0.293	0.000	1.000			
17	0.442	0.483	0.581	0.570	0.545	0.628	0.299	0.816	0.791	0.130	0.438	0.770	0.641	0.886	0.703	0.274	1.000		
18	0.666	0.000	0.444	0.008	0.397	0.737	0.849	0.325	0.140	0.743	0.946	0.000	0.143	0.256	0.000	0.878	0.260	1.000	
19	0.547	0.000	0.077	0.001	0.131	0.584	0.992	0.056	0.173	0.297	0.928	0.000	0.114	0.293	0.000	0.999	0.272	0.860	1.000
20	0.526	0.162	0.803	0.875	0.316	0.697	0.020	0.879	0.898	0.215	0.188	0.517	0.808	0.625	0.517	0.029	0.828	0.126	0.022

注:表 4 中代表物种的序号与表 2 中物种的排序一致。

Note: The ordinal number of the species in the table is consistent with the order of the species in Table 2.

有某一资源时,它们的生态位就会出现重叠,但并不表明物种相互之间一定处于竞争关系,它们也可能共享该资源环境(林思祖等,2002)。张忠华等(2009,2010)表明由于岩溶石山的地形地貌复杂,不同位置的小生境均存在差异,致使植物为与其生境特点相适应,出现分布上的差异,导致某些物种倾向于在局部适宜的生境斑块中呈现出较高的聚集度,而在适宜生境斑块以外的空间分布较为贫乏,从而表现为物种的生态位宽度、重叠值以及相互关系并不呈正相关,须与环境的实际情况相结合。所以即使在同一种岩溶洞穴环境中,不同的水平和垂直空间上光照条件和土壤基质也存在显著的差异,如洞穴内外的光照差异和洞穴壁地的土壤基质差异等,从而呈现出较为复杂的物种分布现状。在本研究中显示,陆氏石山苣苔与其他主要优

势种群的重叠值跨度较大,数值在 0~1 之间均有呈现,但由于对光照和土壤的利用方式效率不同,陆氏石山苣苔和部分优势种即使具有较高的重叠值却仍然可以很好地共存,如多枝铁角蕨等。可是当光照和土壤条件满足时,物种之间的竞争关系更为显著,而在此关系下陆氏石山苣苔的优势度明显较低,表现为竞争劣势,如陆氏石山苣苔与日本蛇根草、中越秋海棠、显脉楼梯草之间等。可见陆氏石山苣苔对生境的要求十分苛刻,其模式产地的洞穴环境在光照、温湿度以及土壤条件上对其营造出较为完美的保护机制,使该极小种群野生植物在此很好的生存,而生境一旦破坏种群灭绝或许将无法被阻止。由于陆氏石山苣苔仅仅分布于面积有限的岩石面上,所占据的生存面积和空间十分有限,实验所涉及的 30 个样方已经基本全部涵盖了研究对

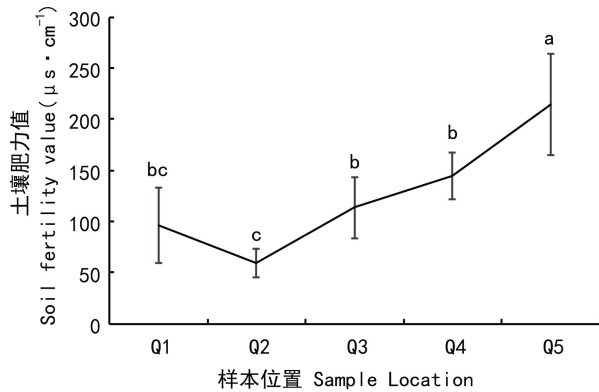


图 1 陆氏石山苣苔植物小生境各位置土壤肥力
Q1. 洞内石壁面; **Q2.** 洞外石壁面; **Q3.** 洞内地壁交界处;
Q4. 洞外地壁交界处; **Q5.** 洞内平地。图中
 同一折线上不同字母表示差异显著。

Fig. 1 Soil fertility at different locations in *Petrocodon lui* habitats **Q1.** Inner wall of the cave; **Q2.** Outer wall of the cave; **Q3.** Intersection of the ground and the inner wall of the cave; **Q4.** Intersection of the ground and the outer wall of the cave; **Q5.** Ground inside the cave. Different letters indicate significant differences on the same polyline.

象所分布的所有角落,实际上也从陆氏石山苣苔分布和生长的最佳位置到生长较差的边缘位置以及完全没有分布的洞穴岩壁外侧逐一进行了考量。此外,针对几乎成垂直分布的、局限分布于适生区域的岩石面上的物种进行其群落物种组成、群落结构方面的研究,尚属少见。因此,根据以上各方面的调查、分析以及讨论,可以看出陆氏石山苣苔在其自然生境下,自身具有极强的环境适应性,可以在土壤基质贫瘠以及覆盖稀薄的条件下生长发育,从而具有较广的生态位宽度,但其生存竞争力薄弱,在环境条件充足情况下出现多物种间的生态位重叠必然因竞争不过其他物种而导致死亡。所以在保护策略上我们建议以就地保护为主,尽可能减少人为对环境的干扰,并在此基础上以种子为基点进一步的研究其生理特征与环境指标之间的关系,为后期的迁地保护提供科学依据。

参考文献:

CHEN L, LI MZ, ZHAO Y, 2009. Improvement and experiment of the portable soil EC Detector [J]. J Agric Mechan Res, 7:

- 175-177. [陈玲, 李民赞, 赵勇, 2009. 便携式土壤电导率测试仪改进设计及实验 [J]. 农机化研究, 7:175-177.]
- DENG LJ, GAO XS, JING YY, et al, 2007. Study on electrical conductivity and fertility evaluation of purple soil in the hilly region of Sichuan basin [J]. J Sichuan University (Nat Sci Ed), 44(4): 883-886. [邓良基, 高雪松, 敬芸仪, 等, 2007. 四川盆地丘陵区紫色土电导率与肥力评价探讨 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 44(4): 883-886.]
- FANG D, QIN DH, ZENG L, 1993. New plants of Gesneriaceae from Guangxi of China [J]. Acta Phytotax Sin, 31(5): 463-471. [方鼎, 覃德海, 曾玲, 1993. 广西苦苣苔科新植物 [J]. 植物分类学报 31(5): 463-471.]
- HURLBERT SH, 1978. The measurement of niche overlap and some relatives [J]. Ecology, 59(59): 67-77.
- JIN JY, QIN WG, LUO LJ, et al, 2013. Research on the niche of dominant species population of endangered plants *Kmeria septentrionalis* community [J]. Guihaia, 33(3): 300-305. [金俊彦, 覃文更, 罗柳娟, 等, 2013. 濒危植物单性木兰群落优势种群生态位研究 [J]. 广西植物, 33(3): 300-305.]
- LEIBOLD MA, 1995. The niche concept revisited: mechanistic models and community context [J]. Ecology, 76(5): 1371-1382.
- LEVINS R, 1968. Evolution in changing environments: some theoretical explorations [M]. Monogr Pop Biol.
- LIN DY, XING SH, ZHAO B, et al, 2007. Niches of rare and endangered herbage species in forest vegetations of Beijing mountainous region [J]. Chin J Ecol, 26(6): 781-786. [林大影, 邢韶华, 赵勃, 等, 2007. 北京山区森林植被中珍稀濒危草本植物生态位 [J]. 生态学杂志, 26(6): 781-786.]
- LIN SZ, HUANG SG, HONG W, et al, 2002. The Characteristics of Multi-dimension Niche of Dominant Populations in Chinese fir and Broad-leaved Mixed Forest [J]. Acta Ecol Sin, 22(6): 962-968. [林思祖, 黄世国, 洪伟, 等, 2002. 杉阔混交林主要种群多维生态位特征 [J]. 生态学报, 22(6): 962-968.]
- LIU Y, XU WB, HUANG YS, 2011. *Primulina guangxiensis* sp. nov. (Gesneriaceae) from a karst cave in Guangxi, China [J]. Nord J Bot, 29(6): 682-686.
- MA Y, GAO C, GRUMBINE RE, et al, 2013. Conserving plant species with extremely small populations (PSESP) in China [J]. Biodivers Conserv, 22(3): 803-809.
- MIDDLETON D, SANGVIROTJANAPAT S, LA-ONGSRI W, 2015. A new species of *Petrocodon* (Gesneriaceae) from Thailand [J]. Thail For Bull (Bot), 43: 15-17.
- MÖLLER M, WEI YG, WEN F, et al, 2016. You win some you lose some: updated generic delineations and classification of Gesneriaceae—implications for the family in China [J]. Guihaia, 36: 44-60. [MÖLLER M, 韦毅刚, 温放, 等, 2016. 得与失: 苦苣苔科新的属级界定与分类系统——中国该科植物之变迁 [J]. 广西植物, 36: 44-60.]
- PIANKA ER, 2003. The structure of lizard communities [J]. Ann Rev Ecol Syst, 4(41): 53-74.
- SONG YC, 2001. Vegetation ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press. [宋永昌, 2001. 植被生态

- 学 [M]. 华东师范大学出版社.]
- WANG BS, PENG SL, 1997. Vegetation ecology: communities and ecosystems [M]. Beijing: China Environmental Press. [王伯荪, 彭少麟, 1997. 植被生态学: 群落与生态系统 [M]. 中国环境科学出版社.]
- WANG LL, WANG GL, HUANG YJ, et al, 2006. Age structure and niche of the endangered *Magnolia sieboldii* in Huangshan Mountain [J]. Acta Ecol Sin, 26(6):1862-1871. [王立龙, 王广林, 黄永杰, 等, 2006. 黄山濒危植物小花木兰生态位与年龄结构研究 [J]. 生态学报, 26(6):1862-1871.]
- WANG Q, LI MZ, WANG ML, 2003. Development of a portable detector for soil electrical conductivity [J]. J Chin Agric Univ, 8(4):20-23. [王琦, 李民赞, 汪懋华, 2003. 便携式土壤电导率测试系统的开发 [J]. 中国农业大学学报, 8(4):20-23.]
- WANG YB, MO NB, TANG GG, 2015. Niches of dominant species in *Dayaoshania cotinifolia* communities [J]. Hubei Agric Sci, 54(4):893-897. [王玉兵, 莫耐波, 汤庚国, 2015. 瑶山苣苔群落优势种群生态位研究 [J]. 湖北农业科学, 54(4):893-897.]
- WEBER A, WEI YG, PUGLISI C, et al, 2011. A new definition of the genus *Petrocodon* (Gesneriaceae) [J]. Phytotaxa, 23(1):49.
- WEI ZQ, LI GX, HAO YQ, 2004. Study of niche characteristics of the main tree populations of a rare and endangered plant community [J]. J SW Agric Univ (Nat Sci Ed), 26(1):1-4. [魏志琴, 李旭光, 郝云庆, 2004. 珍稀濒危植物群落主要种群生态位特征研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 26(1):1-4.]
- WEIDER LJ, 1993. Niche breadth and life history variation in a Hybrid *Daphnia* complex [J]. Ecology, 74(3):935.
- XU WB, LIU Y, LIANG YY, et al, 2010. *Lagarosolen lui* Yan Liu et W. B. Xu, a new species of Gesneriaceae from Guangxi, China. [J]. J Wuhan Bot Res, 2010(1):7-9.
- XU WB, GAO HS, LIU Y, 2008. *Lagarosolen jingxiensis* Yan Liu, H. S. Gao & W. B. Xu, a new species of Gesneriaceae from Guangxi, China [J]. J Trop Subtrop Bot, 28(3):7-9. [许为斌, 高海山, 刘演, 2008. 靖西细筒苣苔——中国广西苦苣苔科一新种 [J]. 热带亚热带植物学报, 28(3):7-9.]
- XU WB, MENG T, ZHANG Q, et al, 2014. *Petrocodon* (Gesneriaceae) in the limestone karsts of Guangxi, China; three new species and a new combination based on morphological and molecular evidence [J]. Syst Bot, 39(3):965-974.
- ZHANG JT, 2011. Quantitative ecology [M]. Beijing: Science Press. [张金屯, 2011. 数量生态学 [M]. 科学出版社.]
- ZHANG ZH, HANG SC, HU G, 2009. Niche characteristics of dominant populations in *Cinnamomum burmannii* community on karst hills of Guilin [J]. For Res, 22(1):63-68. [张忠华, 梁士楚, 胡刚, 2009. 桂林岩溶石山阴香群落主要种群生态位研究 [J]. 林业科学研究, 22(1):63-68.]
- ZHANG ZH, HU G, NI J, 2010. Interspecific segregation of old-growth karst forests in Maolan, Southwest China [J]. Acta Ecol Sin, 30(9):2235-2245. [张忠华, 胡刚, 倪健, 等, 2010. 茂兰喀斯特森林群落的种间分离特征 [J]. 生态学报, 30(9):2235-2245.]
- ZHAO YC, GU XQ, DUN WT, 2013. Application of wireless sensor networks in soil fertility monitoring [J]. Mod Agric Sci Technol, (9):242-243. [赵玉成, 谷小青, 顿文涛等, 2013. 无线传感器网络在土壤肥力监测中的应用 [J]. 现代农业科技, (9):242-243.]
- ZHOU HY, HE YR, ZHANG BH, et al, 2003. Electrical conductivity and fertility evaluation of stagnic anthrosols in the typical region of upper reaches of the Yangtze River [J]. SW Chin J Agric Sci, 16(1):86-89. [周红艺, 何毓蓉, 张保华, 等, 2003. 长江上游典型区水耕人为土的电导率与肥力评价探讨 [J]. 西南农业学报, 16(1):86-89.]