



广西流星天坑植物群落结构与多样性

苏宇乔, 薛跃规*, 范蓓蓓, 莫佛艳, 冯慧喆

(广西师范大学 生命科学院, 广西桂林 541006)

摘要:以广西乐业流星天坑为研究对象,在流星天坑腰部与底部设置样地,采用样方法调查冠层树种及林下植物群落;并用数量生态学的方法分析了天坑植物群落的组成、结构与物种多样性,探讨其生境关联。结果表明:(1)在天坑调查的样地中,胸径大于 10 cm 的冠层树种个体 60 株,隶属于 13 科、17 属、18 种,个体密度约为 188 株/hm²。林下植物种群共记录到 94 株个体,隶属于 28 科、38 属、43 种,个体密度为 23 500 株/hm²。群落物种多样性较丰富,Shannon-Wiener 多样性指数和均匀度指数均较高;冠层树种的科属多样性很高,体现出群落组成的古老和隔离性质。(2)樟科是流星天坑植物群落的优势种,在群落冠层包含 4 个种 14 株个体,在林下包含 3 个种,7 株个体,其中 2 种与群落冠层共有;群落的林下层含物种数较多的科包括大戟科(4 种)、菊科(3 种)、凤尾蕨科(3 种)、鳞毛蕨科(3 种),但天坑植物群落中种群水平的优势现象不明显。(3)林下植物包含了各种生长型,以灌木数量最多,禾草类植物数量最少,乔木的幼苗也较少,体现出天坑的生境提供了较丰富的资源生态位,同时也表明乔木的幼苗更新不良。(4)流星天坑大树数量比例高,在样地中记录到的 60 株个体中,最小胸径为 17.0 cm,最大胸径 104.0 cm,胸径> 30 cm 的大树共 34 株,占全部立木比例 56.6%,体现出天坑森林群落的原始性并且未受到干扰破坏。(5)双向指示种分析表明,广西乐业天坑林下植物对生境的响应更为敏感,但无论冠层还是林下层其现状分布并不能完全把坑腰和坑底两种生境分离。该研究结果为深入开展天坑这种特殊生境下植物种群以及群落的发生、演替和生态适应性的研究提供了基础数据及理论依据。

关键词:喀斯特天坑;植物群落;地理成分;物种多样性;双向指示种分析

中图分类号: Q948.15⁺7

文献标志码: A

Plant Community Structure and Species Diversity in Liuxing Tiankeng of Guangxi

SU Yuqiao, XUE Yuegui*, FAN Beibei, MO Foyan, FENG Huizhe

(College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: A field survey was carried out in the Liuxing Tiankeng of Leye, Guangxi, to collect plant community data. Sampling plots were set up using quadrat method at the middle and the bottom of Liuxing Tiankeng for the census of canopy trees and understory plant community. Species composition, community structure, and diversity were analyzed using quantitative ecology methods and the species-habitat association was explored. The results are as follows, (1) 60 canopy trees with a diameter at breast height (DBH) = 10 cm were found from the sampling plot, which belonged to 13 families, 17 genera, and 18 species, and the stem density was ≈ 188 plant/hm². In the understory layer, 94 plant individuals of 43 species from 28 families and 38 genera were recorded, and the stem density was 23 500 plant/hm². The species diversity

收稿日期: 2016-08-27; 修改稿收到日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (31260113)

作者简介: 苏宇乔 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事野生植物资源生态保护研究。E-mail: yqsu_2015@163.com

* 通信作者: 薛跃规, 博士, 教授, 从事植物分类和植物区系研究。E-mail: xueyuegui@126.com

in the community was rich, and Shannon-Wiener diversity index and evenness index was relative high. The family- and generic-level diversity of canopy trees was very high, reflecting the ancient and isolated nature in the community composition. (2) The dominant family was Lauraceae in Liuxing Tiankeng, which consisted of 4 species and 14 individuals in the canopy layer; while in the understory, it comprised 3 species and 7 individuals, of which 2 species were shared by the canopy layer. Families dominant in the understory layer with rich species were Euphorbiaceae (4 species), Compositae (3 species), Pteridaceae (3 species), and Dryopteridaceae (3 species). However, the species-level dominance was not obvious in the Tiankeng plant community. (3) The plant community in the understory layer encompassed various growth forms, with the majority of shrubs, the least of graminoids, and the less abundant tree seedlings, reflecting that the habitat in Liuxing Tiankeng provided abundant resource niches, and that the trees could not regenerate well with seedlings and saplings. (4) A high percentage of large trees existed in Liuxing Tiankeng. Of the 60 trees recorded, tree DBH ranged from 17.0 cm to 104.0 cm, with 34 trees having > 30 cm DBH, accounting for 56.6% of all the trees. These findings showed that Tiankeng forest community was primitive and free from human disturbance. (5) Two-way indicator species analysis (TWINSpan) showed that plant community in the understory layer was more sensitive in response to habitat heterogeneity. However, none of the existing distribution in the canopy and understory layer could entirely separate the habitats at the middle and the bottom of Liuxing Tiankeng. These results will provide the baseline data and theoretical basis for further research on the occurrence, succession, and ecological adaptation of the plant communities in the karst Tiankengs with such special habitats.

Key words: Karst Tiankeng; plant community; geographic element; species diversity; TWINSpan

特殊地貌或特殊生境下的植物群落及植物区系特征对于了解一个区域植被及植物群落的分布、演替、环境变迁以及植物的进化均有着重要的意义^[1]。天坑是近年来在喀斯特地区发现的一类深陷地表的负地形地质奇观,也称喀斯特天坑(karst Tiankeng),在世界上仅见于少数几个国家。在中国的重庆和广西均发现大型天坑,而以广西乐业发现的大型天坑群最为典型和壮观^[2-4]。喀斯特天坑的发育同时也伴随着植物的侵入。国外对近似于天坑的大型岩溶塌陷区(sinkhole 或 large doline)的研究表明,植物与环境发生长期相互作用,经历定居、适应、竞争到形成稳定的群落的一系列生态过程,形成了独特的天坑植物群落^[5-7],分布于坑底的木本植物群落,则可称为天坑森林或“地下森林”。由于天坑多为垂直的塌陷,地形陡峭,人迹难至,从而客观上使天坑植被避免了人类活动的影响,其植被现状反映了自然的地质和生态过程。也正因天坑生境的难达性,尽管目前有关单位已对乐业天坑群开展了科学考察,但相关内容主要集中于地质考察和旅游探险等方面,天坑植物资源方面的研究仅见个别报道^[8-9],尚未见对天坑植被和植物群落结构和多样性开展系统的研究报道。本研究首次对广西乐业流星天坑开展植被和植物群落调查,分析流星天坑的植物群落结构和多样性,旨在为揭示天坑发育过程中,植物群落和植物区系学建成和演替规律提供材料。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

广西乐业天坑群位于乐业县中北部,地处 $106^{\circ}10' \sim 106^{\circ}51'E, 24^{\circ}30' \sim 25^{\circ}03'N$ 之间,属云贵高原到广西丘陵过渡的山原地带。该区属亚热带季风气候、云贵高原和南岭暖湿气候交错地带,形成独特的地方气候特点^[10]。该区地形地貌复杂,主要以岩溶地貌构成的石山为主,其中既有岩溶地貌的峰丛洼地,也有大小有别、深浅各异且周壁常常较为陡峭的天坑溶洞,海拔在 $920 \sim 1\,519$ m 之间,多为 $1\,000$ m 以上。区内地下河极为发达,水文地质条件优越。流星天坑深度 290 m,口部面积约 1.488×10^5 m²,在乐业天坑群中排名第二,仅次于大石围天坑。

1.2 植物调查

在流星天坑的坑腰和坑底下选择合适的地段设置样地开展植物调查。考虑到地形和实际植被分布情况,坑腰和坑底分别调查 4 个样方,每个样方为 400 m²,正方形。整个流星天坑共调查了 8 个样方,样方总面积为 $3\,200$ m²,样方编号 P1~P8,其中前 4 个样方为坑腰位置的样方,后 4 个样方为坑底样方。对样方内 ≥ 10 cm 的树木个体进行每木调查,现场识别鉴定种名,用围尺测量胸径(diameter at breast height, DBH),用测高器((Suunto PM-5/1520, Finland))测定树高。林下植被采用小样

方进行调查,在每个 400 m² 的样方中随机设置 5 个 1 m² 的小样方,记录小样方内的草本、灌木及乔木幼苗的多度和频度。

1.3 数据分析

野外调查数据在电脑中录入电子表格后,进行统计分析,计算冠层树种的重要值及冠层和林下植物群落样方的多样性指数、均匀度等指标,并进行双向指示种分析(two-way indicator species analysis, TWINSpan)。

(1)冠层树种重要值

$$IV=RF+RA+RD$$

上式中,IV 为重要值(Importance value);RF 为相对频度(relative frequency),即某个种出现的样方数占全部中出现的总样方数的百分比值;RA 为相对多度;RD 为相对优势度(relative dominance),对于树种即为相对胸高断面积。

(2)多样性指数与均匀度

$$D_{sw} = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$E = D_{sw} / \ln S$$

上述公式中, D_{sw} 为香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index); E 为均匀度(Evenness); S 为物种数; P_i 为第 i 种的相对多度,即 $P_i = n_i / N$,其中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为总个体数。

(3)双向指示种分析

分别用冠层树种和林下植物群落数据进行双向指示种分析(TWINSpan),以探索群落物种组成及分布对生境异质性的反映。TWINSpan 是一种经典的群落分析方法和程序,分类结果可反映群落与生境的关联;本研究分别以对冠层树种和林下植物数据表进行 TWINSpan 分析,通过观察 TWINSpan 分类结果对坑腰和坑底两种生境的分离程度,还可比较冠层树种与林下植物的联系及其对分类结果的敏感性。

多样性指标及重要值采用生态学多元分析软件包 PC-ORD 6.0^[11] 来完成计算;TWINSpan 分析在

统计软件 Community Analysis Package (CAP) 5.0^[12] 上运行。另外,为直观地了解冠层树种的结构特征,用软件 Statistica 8.0^[13] 对胸径和树高做出直方图。

2 结果与分析

2.1 植物群落的种类组成

流星天坑样地物种相对来说很丰富。在群落冠层树种中,记录到 60 株个体包含了 18 个不同的物种,种上更高级别的分类阶层也很丰富,以单种属、单种科占绝对优势(表 1,表 2)。从植物系统发育的角度看,越高级别的分类群,其起源越是古老。流星天坑冠层的主要代表种有川钓樟(*Lindera pulcherrima* var. *hemsleyana*)、掌叶木(*Handeliodendron bodinieri*)、西南桦 *Betula alnoides*、南酸枣(*Chorospodias axillaris*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)和多脉鹅耳枥(*Carpinus polyneura*)等,这些均为重要和原始的木本属,显然流星天坑的树种分类群组成具备了古老和受到隔离而独立分化的植物区系特征;尽管林下植物的组成中,属种比、科种比,其数值相对较高,但仍具有相近的特征,即科属均为寡种属甚至是单种属;同时,每公顷的个体密度也较高(表 1,表 3)。

群落冠层树种优势现象不明显,缺乏占绝对优势的单优种,而科的丰富度较突出。以樟科(Lauraceae)优势度最大,它也是亚热带山地植被的优势科,在流星天坑樟科包含 5 个种。其余 12 个科中仅槭树科包含 2 个种,其他均为单属单种(表 2),科属区系富多样性、种群分化不明显,而隔离性质明显。此外,区系成分的古老特征也较为明显,除樟科外,其他如胡桃科(Juglandaceae)、山茱萸科(Cornaceae)等在系统分类中也是比较古老的科。群落生态学特征方面,优势现象并不明显。考虑重要值排序及胸面积大小,川钓樟、掌叶木、西南桦、南酸枣、臭椿和多脉鹅耳枥等 6 个树种为共优势种,而在亚热带山地常绿阔叶林群落中,通常会出现个体数量占绝对优势的单优种或少数几个共优种。

表 1 广西乐业天坑植物分类群丰富度与个体密度
Table 1 Taxonomic richness and stem density

层次 Layer	科 Family	属 Genus	种 Species	总个体数 Total number of stems	个体密度 Stem density /(stems · hm ⁻²)
冠层植物 Canopy trees	13	17	18	60	187.5
林下植物 Understory plants	28	38	43	94	23 500

表 2 广西乐业天坑群落冠层树种组成及重要值

Table 2 The composition of canopy tree species and their importance values

种名 Species	隶属科 Family	样方频数 Frequency	个体数 No. of stems	胸面积 Basal area /cm ²	重要值 Importance value
川钓樟 <i>Lindera pulcherrima</i> var. <i>hemsleyana</i>	樟科 Lauraceae	6	8	13 780	13.40
掌叶木 <i>Handeliodendron bodinieri</i>	无患子科 Sapindaceae	4	7	20 470	13.30
西南桦 <i>Betula alnoides</i>	桦木科 Betulaceae	4	7	19 412	12.98
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	漆树科 Anacardiaceae	2	4	14 930	8.36
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	苦木科 Simarubaceae	3	4	11 889	8.22
多脉鹅耳枥 <i>Carpinus polyneura</i>	榛木科 Corylaceae	3	4	11 409	8.08
核桃 <i>Juglans regia</i>	胡桃科 Juglandaceae	4	6	4 114	7.76
八角枫 <i>Alangium chinense</i>	八角枫科 Alangiaceae	3	4	1 901	5.18
油桐 <i>Vernicia fordii</i>	大戟科 Euphorbiaceae	3	3	1 155	4.40
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	樟科 Lauraceae	2	3	1 842	3.81
黔桂黄肉楠 <i>Actinodaphne kweichowensis</i>	樟科 Lauraceae	1	2	1 238	2.28
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	漆树科 Anacardiaceae	1	2	767	2.14
榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i>	榆科 Ulmaceae	1	1	2 043	1.97
簇叶新木姜 <i>Neolitsea confertifolia</i>	樟科 Lauraceae	1	1	1 886	1.92
朴树 <i>Celtis tetrandra</i> ssp. <i>sinensis</i>	榆科 Ulmaceae	1	1	1 257	1.73
灯台树 <i>Cornus controversa</i>	山茱萸科 Cornaceae	1	1	616	1.54
香椿 <i>Toona sinensis</i>	楝科 Meliaceae	1	1	415	1.48
野鸦椿 <i>Euscaaphis japonica</i>	省沽油科 Staphyleaceae	1	1	314	1.44

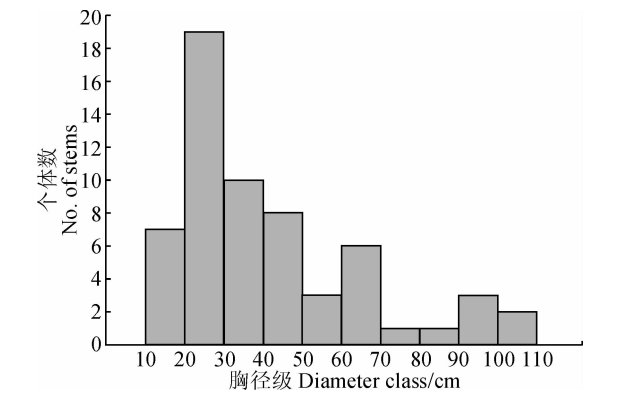


图 1 广西乐业天坑样地立木径级分布直方图

Fig. 1 Histogram showing tree diameter distribution

流星天坑林下植物的种类组成及生长型列于表 3。林下植物包含了各种生长型,以灌木的数量最多,禾草类植物数量最少,乔木的幼苗也较少。这一方面体现出天坑的生境提供了较丰富的资源生态位,同时也表明乔木的幼苗更新不良,群落已处于演替的亚顶极阶段。

2.2 群落结构与物种多样性

流星天坑大树个体数量比例较高。在群落冠层,样方调查中记录到的 60 株个体中,最小胸径为 17.0 cm,最大胸径 104.0 cm。胸径大于 30 cm 的大树共 34 株(图 1),占全部立木比例 56.6%。由于立木的胸径总体上与树龄呈正相关,因此,立木的

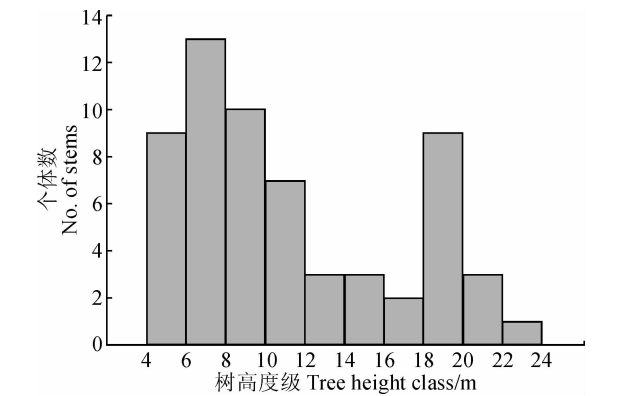


图 2 广西乐业天坑样地立木树高分布直方图

Fig. 2 Histogram showing tree height distribution

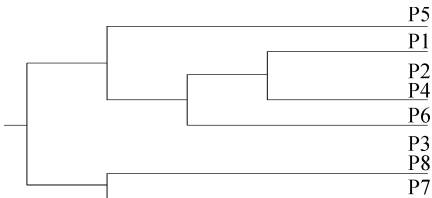
径级分布体现了群落的原生性和古老性。树高分布方面,高度≤10 m 的立木 32 株,占比例 53.4%(图 2);总体来说,没有特别高的树,最高的一株树为 24.0 m,考虑到立木胸径普遍较大,是否由于天坑特殊的生境限制了树高的生长,有待开展深入的研究分析。

在物种多样性指标方面,无论是群落冠层还是林下,物种的种群分布均具有很高的均匀度。样方 4 中的群落冠层植物组成及样方 5 和 6 中的林下植物组成其均匀度达到最大值(表 4)。由于均匀度高,因此,香农-维纳多样性指数也比较高,这点与前述对样地物种分类群组成及个体分布的直观分析相吻合。

表 3 广西乐业天坑群落林下植物组成				
Table 3 The species composition in the understory layer of the plant community				
种名 Species	隶属科 Family	生长型 Growth form	样方频数 Frequency	个体数 No. of stems
八角枫 <i>Alangium chinense</i>	八角枫科 Alangiaceae	乔木幼苗 Tree seedling	4	6
滇黄精 <i>Polygonatum kingianum</i>	百合科 Liliaceae	非禾草类 Forb	1	1
竹根七 <i>Reineckia carnea</i>	百合科 Liliaceae	非禾草类 Forb	3	3
广防风 <i>Epimeredi indica</i>	唇形花科 Labiatae	非禾草类 Forb	2	2
石岩枫 <i>Mallotus repandus</i>	大戟科 Euphorbiaceae	灌木 Shrub	1	1
圆叶乌柏 <i>Sapium rotundi folium</i>	大戟科 Euphorbiaceae	灌木 Shrub	1	1
油桐 <i>Vernicia fordii</i>	大戟科 Euphorbiaceae	乔木幼苗 Tree seedling	2	3
毛桐 <i>Mallotus barbatus</i>	大戟科 Euphorbiaceae	灌木 Shrub	4	4
井栏边草 <i>Pteris vittata</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	1	1
凤尾蕨 <i>Pteris cretica</i> var. <i>nervosa</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	3	3
线羽凤尾蕨 <i>Pteris linearis</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	2	3
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	禾亚科 Agrostidoideae	禾草类 Graminoid.	1	1
荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	禾亚科 Agrostidoideae	禾草类 Graminoid	4	5
渐尖毛蕨 <i>Cyclosorus acuminata</i>	金星蕨科 Thelypteridaceae	蕨类 Fern	2	2
中国旌节花 <i>Stachyurus chinensis</i>	旌节花科 Stachyuraceae	灌木 Shrub	1	1
天名精 <i>Carpesium abrotanoides</i>	菊科 Compositae	非禾草类 Forb	1	1
总序蓟 <i>Cirsium racemi forme</i>	菊科 Compositae	非禾草类 Forb	1	2
柔毛艾纳香 <i>Blumea mollis</i>	菊科 Compositae	非禾草类 Forb	3	3
翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	卷柏科 Selaginellaceae	蕨类 Fern	5	6
假杜鹃 <i>Barleria cristata</i>	爵床科 Acanthaceae	非禾草类 Forb	5	6
低头贯众 <i>Cyrtomium nephrolepioides</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	蕨类 Fern	1	1
大平鳞毛蕨 <i>Dryopteris bodinieri</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	蕨类 Fern	1	1
镰羽贯众 <i>Cyrtomium balansae</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	蕨类 Fern	2	2
大叶紫珠 <i>Callicarpa macrophylla</i>	马鞭草科 Verbenaceae	灌木 Shrub	1	1
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	马桑科 Coriariaceae	灌木 Shrub	1	1
桃 <i>Amygdalus persica</i>	蔷薇科 Rosaceae	乔木幼苗 Tree seedling	1	1
颠茄 <i>Atropa belladonna</i>	茄科 Solanaceae	非禾草类 Forb	3	3
接骨草 <i>Sambucus chinensis</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	非禾草类 Forb	1	2
鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	三白草科 Saururaceae	非禾草类 Forb	2	2
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	桑科 Moraceae	灌木 Shrub	1	1
肾蕨 <i>Nephrolepis cordifolia</i>	肾蕨科 Nephrolepidaceae	蕨类 Fern	2	2
野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	省沽油科 Staphyleaceae	灌木 Shrub	1	1
石韦 <i>Pyrrosia lingua</i>	水龙骨科 Polypodiaceae	蕨类 Fern	2	2
土牛膝 <i>Achyranthes aspera</i>	苋科 Amarantaceae	非禾草类 Forb	2	2
糯米团 <i>Gonostegia hirta</i>	荨麻科 Urticaceae	灌木 Shrub	1	1
紫麻 <i>Oreocnide frutescens</i>	荨麻科 Urticaceae	灌木 Shrub	1	1
苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科 Urticaceae	灌木 Shrub	3	4
青篱柴 <i>Tirpitzia sinensis</i>	亚麻科 Linaceae	灌木 Shrub	1	1
朴树 <i>Celtis tetrandra</i> ssp. <i>sinensis</i>	榆科 Ulmaceae	乔木幼苗 Tree seedling	1	1
阴香 <i>Cinnamomum burmanii</i>	樟科 Lauraceae	乔木幼苗 Tree seedling	1	1
川钓樟 <i>Lindera pulcherrima</i> var. <i>hemsleyana</i>	樟科 Lauraceae	乔木幼苗 Tree seedling	2	2
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	樟科 Lauraceae	灌木 Shrub	4	4
琉璃草 <i>Cynoglossum zeylanicum</i>	紫草科 Boraginaceae	非禾草类 Forb	2	2

表 4 广西乐业天坑样方单元植物物种多样性
Table 4 Plant species diversity by sampling plots

样方单元 Plot	冠层植物群落 Canopy plant community				林下植物群落 Undergrowth vegetation			
	个体数 No. of stems	物种数 No. of species	均匀度 Evenness	香农-维纳指数 Shannon-Wiener Index	个体数 No. of stems	物种数 No. of species	均匀度 Evenness	香农-维纳指数 Shannon-Wiener Index
P1	8	6	0.97	1.73	18	16	0.99	2.74
P2	8	5	0.97	1.56	16	14	0.99	2.60
P3	6	5	0.97	1.56	7	6	0.98	1.75
P4	5	5	1.00	1.61	8	7	0.98	1.91
P5	9	5	0.95	1.52	14	14	1.00	2.64
P6	10	6	0.95	1.70	14	14	1.00	2.64
P7	7	4	0.92	1.28	8	6	0.97	1.73
P8	7	6	0.98	1.75	9	7	0.97	1.89



P1~P4. 坑腰位置样方;P5~P8. 坑底位置样方

图 3 广西乐业天坑基于冠层树种多度的双向指示种分析

P1 to P4 represent plots at the middle, while P5 to P8
represent plots at the bottom of Tiankeng

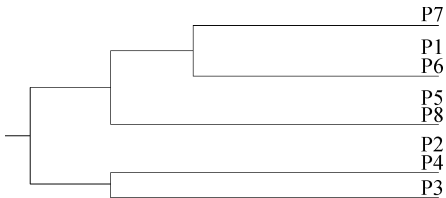
Fig. 3 Two-way indicator species analysis (TWINSpan)
based on canopy tree abundance

2.3 群落的空间关联

双向指示种分析(TWINSpan)是植物群落分类的经典方法,可生成与聚类分析类似的树状图作为群落划分的结果。因而,可根据 TWINSpan 分类结果,结合生境类型,评价植物群落的划分与特定生境的匹配程度及敏感性。在流星天坑所调查的各个样方中。P1~P4 为坑腰位置的样方,P5~8 为坑底位置的样方。坑腰和坑底环境条件无论是海拔、光照、温湿度等都不一样,如果 TWINSpan 分析能把坑腰与坑底分开,说明群落的生境特异性高,其分离程度体现了植物群落对生境的响应。图 3 和图 4 表明,无论是基于群落冠层的数据表还是林下植物数据表所做的 TWINSpan 分析,对坑腰和坑底两种生境的分离均不理想,但与群落冠层相比较,林下植物对生境的分离程度和敏感性更高(图 4)。

3 讨 论

流星天坑植物群落物种多样性较丰富,Shannon-Wiener 多样性指数和均匀度指数均较高;同时冠层树种的科属多样性很高,体现出群落组成的古老性和隔离性质。在调查的样地中,胸径大于 10



P1~P4. 坑腰位置样方;P5~P8. 坑底位置样方

图 4 广西乐业天坑基于林下植物多度的双向指示种分析

P1 to P4 represent plots at the middle, while P5 to P8
represent plots at the bottom of Tiankeng

Fig. 4 Two-way indicator species analysis (TWINSpan)
based on understory plant abundance

cm 的冠层树种个体 60 株,隶属于 13 科、17 属、18 种,个体密度约为 188 株/hm²。林下植物群落共记录到 94 株个体,隶属于 28 科、38 属、43 种,个体密度为 23 500 株/hm²。天坑植物群落中种群水平的优势现象不明显,但在科级水平上,存在较明显的区系优势现象。樟科是华南亚热带山地植被的优势科,同时本项研究显示该科也是流星天坑植物群落的优势科,在冠层植物群落中包含 4 个种 14 株个体,在林下植物群落中包含 3 个种,7 株个体,其中 2 种与群落冠层组成共有。群落中林下植物含物种数较多的科包括大戟科(4 种)、菊科(3 种)、凤尾蕨科(3 种)、鳞毛蕨科(3 种)。林下植物包含了各种生长型,以灌木数量最多,禾草类植物数量最少,乔木的幼苗也较少。这一方面体现出天坑的生境提供了较丰富的资源生态位,同时也表明乔木的幼苗更新不良。

群落结构方面,流星天坑大树个体数量比例高。胸径大于 30 cm 的大树共 34 株,占全部立木比例 56.6%,体现出天坑森林群落的原始性并且未受到干扰破坏。双向指示种分析(TWINSpan)表明,林下植物对生境的响应更为敏感,但无论冠层还是林下植物群落,其现状分布均不能完全把坑腰和坑

底两种生境分离。这些结果可为深入开展喀斯特天坑植物种群与生境的关联、以及植物群落、植被类型的发生、演替和生态适应性的研究提供基础数据及理论依据。

虽然天坑植物区系具有古老和隔离的性质,但对照《广西植物名录》及本地区系的特征^[14, 15],流星天坑样地的组成植物并没有出现独特的特有现象,所有物种均与广西植物区系共通,由此可以推断,天坑植物区系并不是独立发生的,它来自广西植物区系。目前一般认为,广西乐业天坑形成于约 6 500 万年前^[16],而维管植物区系的形成要远早于天坑的

形成^[17],只是由于天坑的形成,其植物区系和植被在隔离的状态下生长发育。同时,由于广西的地貌特征总体来说是山地丘陵性盆地地貌,呈盆地状,且喀斯特地貌广布,占广西总面积的 41%^[18],因此土壤侵蚀和石漠化严重。而研究已经表明,在岩溶喀斯特地区由于人类活动包括农业、牧业及森林砍伐的影响^[19, 20],不少喀斯特地区地面部分森林植被均已退化或不复存在。从这个角度来说,广西喀斯特天坑成为广西本地植被和植物区系,尤其是石灰岩植物区系的“现代避难所”。

参考文献:

[1]

OCHOA D, ZAVADA M S, LIU Y S, *et al.* Floristic implications of two contemporaneous inland upper Neogene sites in the eastern US; Pipe Creek Sinkhole, Indiana, and the Gray Fossil Site, Tennessee (USA) [J]. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 2016, **96**(2): 239-254.

[2]

税伟,陈毅萍,王雅文,等. 中国喀斯特天坑研究起源、进展与展望[J]. *地理学报*, 2015, **70**(3): 431-446.
SHUI W, CHEN Y P, WANG Y W, *et al.* Origination, study progress and prospect of karst Tiankeng research in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(3): 431-446.

[3]

朱学稳, TONY WALTHAM. 天坑释义[J]. *中国岩溶*, 2006, **25**(S1): 35-42.
ZHU X W, WALTHAM T. Tiankeng: Definition and description[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, **25**(S1): 35-42.

[4]

朱学稳,朱德浩,黄保健,等. 喀斯特天坑略论[J]. *中国岩溶*, 2003, **22**(1): 51-65.
ZHU X W, ZHU D H, HUANG B J, *et al.* A brief study on Karst Tiankeng[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, **22**(1): 51-65.

[5]

BATORI Z, GALLE R, ERDOS L, *et al.* Ecological conditions, flora and vegetation of a large doline in the Mecsek Mountains (South Hungary) [J]. *Acta Botanica Croatica*, 2011, **70**(2): 147-155.

[6]

OZKAN K, GULSOY S, MERT A, *et al.* Plant distribution-altitude and landform relationships in karstic sinkholes of Mediterranean region of Turkey [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2010, **31**(1-2 SD): 51-60.

[7]

WHITTEN T. Applying ecology for cave management in China and neighbouring countries[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, **46**(3): 520-523.

[8]

苏仕林. 大石围天坑群区药用蕨类植物资源调查[J]. *湖北农业科学*, 2012, **51**(23): 5 376 -5 380.
SU S L. Medical Pteridophyta resources investigation in the Area of Dashiwei Tiankeng Group of Leye County[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, **51**(23): 5 376-5 380.

[9]

党桂兰,冯慧喆,唐启明,等. 广西植物新分布[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2016, **34**(2): 147-150.
DANG G L, FENG H Z, TANG Q M, *et al.* New recorded plant species in Guangxi, China[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, **34**(2): 147-150.

[10]

朱学稳,黄保健. 广西乐业大石围天坑群: 发现、探测、定义与研究[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2003.

[11]

MCCUNE B, MEFFORD M J. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 6.0 [M]. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, USA; 2011.

[12]

SEABY R, Henderson P. Community Analysis Package 5.0 [DB/CD]. 2014.

[13]

STATSOFT I. STATISTICA (data analysis software system) [DB/CD]. 8.0 ed. Tulsa, Oklahoma, USA; 2007.

[14]

韦毅刚. 广西植物区系的基本特征[J]. *云南植物研究*, 2008, **30**(3): 295-307.
WEI Y G. Fundamental features of Guangxi Flora of China [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2008, **30**(3): 295-307.

[15]

欧祖兰,苏宗明,李先琨. 广西岩溶植被植物区系[J]. *广西植物*, 2004, **24**(4): 302-310.
OU Z L, SU Z M, LI X K. Flora of Karst vegetation in Guangxi[J]. *Guihaia*, 2004, **24**(4): 302-310.

[16]

张继淹,刘金荣. 大石围天坑形成时代及相关问题探讨[J]. *南方国土资源*, 2008, (2): 32-34.
ZHANG J Y, LIU J R. Origination of Dashiwei Tiankeng and a discussion on related issues[J]. *Land and Resources of Southern China*, 2008, (2): 32-34.

[17]

薛跃规,陆祖军,张宏达. 广西地质、地理和植物区系起源与发展[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 1996, **14**(3): 58-65.
XUE Y G, LU Z J, ZHANG H D. The paleogeology, paleogeography and Development of flora in Guangxi area[J]. *Journal of Guangxi Normal University*, 1996, **14**(3): 58-65.

[18]

刘彦随,邓旭升,胡业翠. 广西喀斯特山区土地石漠化与扶贫开发探析[J]. *山地学报*, 2006, **24**(2): 228-233.
LIU Y S, DENG X S, HU Y C. Rocky land degradation and Poverty Alleviation Strategy in Guangxi Karst Mountainous Area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(2): 228-233.

[19]

CALO F, PARISE M. Evaluating the human disturbance to karst environments in southern Italy[J]. *Acta Carsologica*, 2006, **35**(2): 47-56.

[20]

GUTIERREZ F, PARISE M, DE WAELE J, *et al.* A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.

(编辑:潘新社)