

湖南桃源洞国家级自然保护区南方铁杉 种群结构与生存分析

丁巧玲¹, 刘忠成², 王 蕾², 蔡松辰¹, 石祥刚^{1*}, 曾茂生³, 廖文波¹

(1 中山大学 生命科学学院, 广州 510275; 2 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3 湖南桃源洞国家级自然保护区
管理局, 湖南炎陵 412500)

摘 要: 采用样方法对桃源洞国家级自然保护区的牛石坪南方铁杉(*Tsuga chinensis*)群落和梨树洲南方铁杉群落进行调查, 分析群落种类组成和结构特征; 采用 Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数研究群落各层的物种多样性; 依据径级频率分布分析 2 个南方铁杉群落中南方铁杉种群的年龄结构和更新状况。结果表明: (1) 桃源洞的 2 个南方铁杉群落中常绿植物占优势, 群落有一定的季相变化, 夏季呈暗绿色, 秋冬淡黄绿色。(2) 牛石坪南方铁杉群落共有维管植物 13 科 21 属 26 种, 梨树洲南方铁杉群落共有维管植物 22 科 30 属 36 种; 地理成分分析表明温带成分明显高于热带成分, 表现为亚热带山地性质。(3) 群落垂直结构可分为乔木层(进一步分为乔木上层、乔木中层、乔木下层 3 个亚层)、灌木层和草本层。(4) 2 个群落的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均为乔木下层 > 乔木中层 > 灌木层 > 乔木上层, Pielou 均匀度指数为乔木中层和乔木下层 > 乔木上层和灌木层。(5) 牛石坪南方铁杉群落的优势种群为马银花(*Rhododendron ovatum*)、南方铁杉、尖连蕊茶(*Camellia cuspidata*)和鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*), 梨树洲南方铁杉群落的优势种群为银木荷(*Schima argentea*)、南方铁杉、鹿角杜鹃和背绒杜鹃(*Rhododendron hypolematosum*)。(6) 根据年龄结构和生存分析, 牛石坪的南方铁杉种群为衰退型, 低龄级个体和种群数量都严重不足, 难以实现自然更新; 梨树洲的南方铁杉种群为增长型, 低龄级个体数较丰富, 年龄结构分布基本连续, 惟其群落郁闭度较高, 自我更新还存在一定的挑战。根据以上结果建议对牛石坪的南方铁杉群落进行就地保护和适当人为干扰, 对梨树洲群落加强后续监测工作。

关键词: 南方铁杉; 群落结构; 年龄结构; 生存分析; 种群更新; 湖南桃源洞

中图分类号: Q948.15⁺7

文献标志码: A

Structure and Survival Analysis of *Tsuga chinensis* Populations in Taoyuandong National Nature Reserve, Hunan Province

DING Qiaoling¹, LIU Zhongcheng², WANG Lei², CAI Songchen¹,
SHI Xianggang^{1*}, ZENG Maosheng³, LIAO Wenbo¹

(1 School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2 College of Resource Environment and
Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3 Administration Bureau of Taoyuandong National Nature Reserve,
Yanling, Hunan 412500, China)

Abstract: Two *T. chinensis* communities, from Niushiping and Lishuzhou in Taoyuandong National Nature Reserve, are studied by using the methods of plots for the composition and structure of the communities, using Shannon-Weiner index, Simpson index and Pielou index for species diversity of every layers and using diameter class frequency distribution of *T. chinensis* to analyze the age class frequency distribution

收稿日期: 2016-03-10; 修改稿收到日期: 2016-04-29

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2013FY111500); 2015 年度中山大学与广东省本科教学质量和教学改革项目

作者简介: 丁巧玲(1986-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事生态学和古生物学研究。E-mail: qlding@126.com

* 通信作者: 石祥刚, 博士, 讲师, 主要从事植物系统分类与植物资源学研究。E-mail: lssxg@mail.sysu.edu.cn

and the regeneration of the target population. The results are as follows: (1) since the evergreen plants are dominant, the physiognomy of the two communities show some seasonal changes of dark green in summer and light yellow-green in autumn and winter. (2) Twenty-six species in 21 genera of 13 families compose the *T. chinensis* community of Niushiping and the *T. chinensis* community of Lishuzhou contains 22 families, 30 genera with 36 species. Their proportions of temperate genera of seed plants are higher than that of tropical genera, which shows the subtropical montane property of geographical elements. (3) The vertical structure of above two communities can be divided into three layers, i. e. tree layer, shrub layer and herb layer and the tree layer includes three sub-layers, i. e. upper layer, middle layer and lower layer. (4) Shannon-Wiener index and Simpson index arrange as lower layer of tree > middle layer of tree > shrub layer > upper layer of tree in both communities, and Pielou index of middle layer of tree and lower layer of tree is higher than that of upper layer of tree and shrub layer in both communities. (5) The dominant populations of the *T. chinensis* community in Niushiping are *Rhododendron ovatum*, *T. chinensis*, *Camellia cuspidata* and *Rhododendron latoucheae* while the dominant populations of the *T. chinensis* community in Lishuzhou are *Schima argentea*, *T. chinensis*, *Rhododendron latoucheae* and *Rhododendron hypoblematosum*. (6) According to the age frequency distribution and the survival analysis, the *T. chinensis* population from Niushiping is a declining population and unable to regenerate itself because of lacking of enough younger age individuals; the *T. chinensis* population from Lishuzhou is a increasing population with a certain number of younger age individuals and relatively reasonable age structure while the high canopy density could be a limiting factor that challenge its natural regeneration. In conclusion, we suggest that in situ conservation and proper human intervention are necessary for the *T. chinensis* community of Niushiping and further monitoring is essential for the *T. chinensis* community of Lishuzhou.

Key words: *Tsuga chinensis*; community structure; population structure; survival analysis; population regeneration; Taoyuandong of Hunan Province

南方铁杉(*Tsuga chinensis*)是第三纪孑遗植物,中国特有种。南方铁杉的分布虽广但数量少而分散,是珍稀濒危植物,被列为国家Ⅱ级重点保护植物,具有很高的科研价值和潜在的经济价值^[1]。南方铁杉分布于浙江、安徽南部、福建北部、武夷山、江西武功山、湖南莽山、广东北部、广西北部及云南麻栗坡等地,分布区地跨中亚热带至北亚热带^[1]。其分布的垂直高度变化较大,在海拔 600~2 100 m 之间,但以海拔 800~1 400 m 的生长较好^[1]。目前,关于南方铁杉的研究已有许多报道,包括群落结构和物种多样性^[1-6]、空间分布格局和种群动态^[4,7-17]、种间和种内关系^[18-21]、生态位^[5,22]、生长规律^[23-25]、越冬策略^[26]、土壤金属含量与土壤养分关系^[27]、菌根生态学^[28-29]以及扦插繁殖、林隙干扰规律等^[30-31]方面。以上对南方铁杉群落的研究包括浙江九龙山、福建光泽、福建武夷山、江西武夷山、湖南莽山、湖南黄桑坪、广西猫儿山、贵州茂兰和贵州高坡等区域。但至目前为止,还未有对湖南桃源洞南方铁杉群落的研究报道。本研究从南方铁杉群落的外貌、组成、结构和种群年龄结构等方面着手,旨在探讨桃源洞南方铁杉群落的结构和种群的更新,为加强对南方铁杉的保护和管理提供理论依据。

1 研究地概况

桃源洞国家级自然保护区位于湖南省东南部炎陵县的东北部(114° 03' 45" ~ 114° 07' 30" E, 26° 30' 00" ~ 26° 32' 30" N),总面积 113 153 hm²^[32]。该区山峦重叠、地势险峻、沟谷深邃、溪流纵横,属中亚热带季风湿润气候,年平均气温 12.3~14.4 °C,1 月份气温最低(0.2~1.5 °C),7 月份气温最高(25.8~29.7 °C),极端最高气温 34.5 °C(1990 年 8 月 16 日),极端最低气温 9 °C(1991 年 12 月 29 日);年降水量 1 967.9~2 165.2 mm,最大降水强度为 129.6 mm·d⁻¹(1984 年 9 月 1 日),4~6 月降水量占全年的 42%;土壤分属 4 个亚类:山地草甸土(分布海拔 1 700~1 841 m)、山地黄棕壤(分布海拔 1 200~1 700 m)、山地暗黄壤(分布海拔 650~1 200 m)和山地黄红壤(分布海拔 0~650 m)^[33]。

2 研究方法

2.1 样地设置

针对湖南桃源洞国家级自然保护区的植被状态进行实地考察,发现在牛石坪(114° 2' 49.2" E, 26° 25' 53.6" N)和梨树洲(113° 59' 05.54" E, 26° 20' 56.38" N)分别保存有较丰富的南方铁杉种群,为探

讨其种群生存状态,特设置两片样地进行调查,样地面积分别为 1 000 m² 和 1 600 m²。其中,牛石坪样地海拔 1 370 m,坡向东南,坡度 40°,土壤为黄棕壤,郁闭度为 0.65~0.70;梨树洲样地海拔 1 495 m,坡向向东,坡度 45°,土壤为黄棕壤,郁闭度为 0.95。南方铁杉种群在这两片样地中生长状况差异较大,牛石坪样地南方铁杉数量较少但多为大树,鲜有幼树;梨树洲样地南方铁杉数量较多但多为小树,少大树。此外,梨树洲南方铁杉群落的郁闭度明显高于牛石坪南方铁杉群落的郁闭度。因此,对这 2 个南方铁杉群落进行比较研究,将有利于了解南方铁杉种群的生存状态及其更新演替的趋势,可为南方铁杉的保护和管理提供理论依据。本研究采用相邻格子法将 2 个样地进一步划分成面积为 10 m×10 m 的样方,每个样方内再设置 1 个 2 m×2 m 的小样方。样方调查记录植物的种名、胸径、高度、冠幅,起测径阶>1.5 cm;小样方记录植物的种名、株数、高度和盖度。

2.2 数据分析

2.2.1 重要值的计算

根据王伯荪等^[34]的测度方法,调查计算乔、灌木的重要值:

乔木重要值 $IV=(\text{相对多度}+\text{相对频度}+\text{相对优势度})/3\times 100$

灌木重要值 $IV=(\text{相对多度}+\text{相对频度}+\text{相对盖度})/3\times 100$

2.2.2 多样性测度方法

采用马克平等^[35]的测度方法确定南方铁杉群落的物种多样性:

Shannon-Weiner 指数 (H'): $H' = \sum P_i \ln P_i$

Simpson 指数 (D): $D = 1 - \sum P_i^2$

Pielou 均匀度指数 (J_{sw}): $J_{sw} = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$

式中, $P_i = N_i / N$, N 为调查样地中乔木层、灌木层或草本层的总个体数; N_i 为第 i 个物种的个体数; S 为调查样地中乔木层、灌木层或草本层的物种总数。

2.2.3 高度结构和径级结构的划分

根据南方铁杉种群的高度组成,按每隔 2 m 划分成 15 个等级,第 1 高度级为 0~2 m,第 15 高度级为 28~30 m,也是本群落的最大高度级。种群年龄结构采用立木径级代替,共划分 13 个径级,每 5 cm 为一个径级,第 1 径级为 0~5 cm,第 2 径级为 6~10 cm,以此类推,最后把大于 60 cm 的归为第 13 径级^[2]。在绘制种群年龄结构的条形图时,第 1 径级对应第 1 龄级,第 2 径级对应第 2 龄级,以此类推。

2.2.4 静态生命表编制

静态生命表的编制按照江洪^[36]的方法: x 是单位时间年龄等级的中值; a_x 是在 x 龄级内现有的个体数; l_x 是在 x 龄级开始时标准化存活个体数(转化为 1 000); d_x 是从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间标准化死亡数; q_x 是从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间死亡率; T_x 是从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数; e_x 是进入 x 龄级的生命期望寿命; K_x 是消失率(损失度); S_x 是存活率。相关参数的关系和计算公式如下:

$$l_x = a_x / a_0 \times 1\,000$$

$$d_x = l_x - l_{x+1}$$

$$q_x = d_x / l_x$$

$$L_x = (l_x + l_{x+1}) / 2$$

$$T_x = \sum_x^{\infty} L_x$$

$$e_x = T_x / l_x$$

$$K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$$

$$S_x = l_{x+1} / l_x$$

由于牛石坪南方铁杉种群属于“幼龄株数少的衰退种群”,因此无法编制生命表。本研究仅对梨树洲南方铁杉种群编制了生命表和进行了生存分析。此外,在生命表的编制中,为了避免出现负值,往往对各龄级的个体数进行标准化后作匀滑处理^[36]。但是 Wretten 等^[37]认为,生命表分析中产生一些负值虽然与数据假设技术不符,但仍提供有用的生态记录,即表明种群并非静止不动,而是在发展或衰落之中。因此,本研究未对相关数据作匀滑处理,而是将各龄级个体数标准化后直接用于各参数的计算。

2.2.5 生存分析方法

种群的生存分析按照杨凤祥^[38]的方法进行,计算种群生存率函数 $S_{(i)}$ 、累计死亡率函数 $F_{(i)}$ 、死亡密度函数 $f_{(i)}$ 和危险率函数 $\lambda_{(i)}$,并绘制生存曲线、累计死亡率曲线、死亡密度曲线和危险率曲线。这 4 个函数的计算公式如下:

$$S_{(i)} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_i (S_i \text{ 为存活率})$$

$$F_{(i)} = 1 - S_{(i)}$$

$$f_{(i)} = (S_{(i-1)} - S_{(i)}) / h_i (h_i \text{ 为龄级宽度})$$

$$\lambda_{(i)} = 2(1 - S_i) / [h_i(1 + S_i)]$$

3 结果与分析

3.1 群落种类组成及地理成分分析

牛石坪南方铁杉群落共有维管植物 26 种,隶属于 13 科 21 属。其中,裸子植物仅南方铁杉 1 种,被子植物 12 科 20 属 25 种。种子植物中,物种数最多的科为山茶科,共 5 属 5 种;山矾科次之,为 1 属 4

种;樟科和杜鹃花科分别有3属3种和2属3种;五加科和漆树科分别为2属2种和1属2种;其余的科均为1属1种(表1)。梨树洲南方铁杉群落共有维管植物36种,隶属于22科30属。其中,蕨类植物3科3属4种,裸子植物3科4属4种,被子植物16科23属28种。种子植物中,物种数最多的科为山茶科和杜鹃花科,分别为4属5种和2属5种;蔷薇科次之,为2属3种;樟科、壳斗科和松科皆为2属2种;其余的科均为1属1种(表1)。

牛石坪南方铁杉群落中种子植物共21属,其中热带分布区类型10属,占47.62%,温带分布区类型11属,占52.38%;梨树洲南方铁杉群落中种子植物共27属,其中热带分布区类型11属,占44.00%,温带分布区类型14属,占56.00%。2个南方铁杉群落的温带成分均高于热带成分,与其位于罗霄山脉西坡,受到西部和北部温带成分的影响相符合。将桃源洞2个南方铁杉群落的地理成分组成与福建光泽、浙江九龙山、贵阳高坡的南方铁杉群落进行比较,发现四者的温带成分分布在52.38%~65.79%,并且均明显高于热带成分。湖南桃源洞(海拔1370~1495 m)、贵阳高坡(海拔1350~1450 m)、福建光泽(海拔1445~1625 m)、浙江九龙山(海拔1300~1620 m)4个区域均属于中国亚热带常绿阔叶林区,其中湖南桃源洞、贵阳高坡位于常绿林区的南部亚地带,福建光泽、浙江九龙山位于常绿区的北部亚地带,按照地带性规律,南部亚地带的温带成分低于北部亚地带^[39]。但从数据看,贵阳高坡南方铁杉群落的温带成分却与福建光泽、浙江九龙山的基本相当,甚至略高(表2),这可能与其特殊的喀斯特地貌相关^[4]。4个南方铁杉群落的温带成分中,北温带分布、东亚北美间断分布所占的比例较大(表2)。

3.2 群落外貌与垂直结构

在群落外貌上,牛石坪南方铁杉群落和梨树洲南方铁杉群落都为常绿落叶针阔叶混交林,但以常绿树种占优势,亦有部分落叶树种如漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、青榨槭(*Acer davidii*)、柿树(*Diospyros kaki*)、木蜡树(*Toxicodendron sylvestri*)、吴茱萸五加(*Gamblea ciliata* var. *evodii* folia)等,因此群落有一定的季相变化,夏季呈暗绿色,秋冬淡黄绿色。

根据群落的高度级频率分布(图1,a,b),除了草本层外,桃源洞两处的南方铁杉群落的林木层可分为4层,由下至上依次为灌木层、乔木下层、乔木

中层和乔木上层。但由于2个群落的组成及所处的演替阶段不同,两者的分层高度稍为差异:牛石坪群落的灌木层为0~4 m,乔木下层为4~10 m,乔木中层为10~16 m,乔木上层为16~30 m(图1,a);梨树洲群落的0~4 m为灌木层,4~6 m为乔木下层,6~14 m为乔木中层,14~22 m为乔木上层(图1,b)。

从乔木层和灌木层的生活型来看,桃源洞南方铁杉群落共有常绿针叶树3种,常绿阔叶树29种,落叶阔叶树10种。牛石坪南方铁杉群落各层的常绿树种相对多度由上自下依次为89.74%、59.46%、

表1 桃源洞2个南方铁杉群落的种类组成

Table 1 Composition of two *T. chinensis* communities from Taoyuandong

科 Family	牛石坪 Niushiping (NP/NG)	梨树洲 Lishuzhou (NP/NG)
山茶科 Theaceae	5/5	5/4
樟科 Lauraceae	3/3	2/2
杜鹃花科 Ericaceae	3/2	5/2
蔷薇科 Rosaceae	1/1	3/2
山矾科 Symplocaceae	4/1	1/1
壳斗科 Fagaceae	0/0	2/2
松科 Pinaceae	1/1	2/2
五加科 Araliaceae	2/2	1/1
漆树科 Anacardiaceae	2/1	0/0
槭树科 Aceraceae	1/1	0/0
冬青科 Aquifoliaceae	1/1	0/0
忍冬科 Caprifoliaceae	0/0	1/1
卫矛科 Celastraceae	0/0	1/1
椴木科 Clethraceae	1/1	1/1
虎皮楠科 Daphniphyllaceae	0/0	1/1
柿科 Ebenaceae	1/1	0/0
龙胆科 Gentianaceae	0/0	1/1
虎耳草科 Saxifragaceae	0/0	1/1
莎草科 Cyperaceae	0/0	1/1
禾本科 Gramineae	1/1	0/0
百合科 Liliaceae	0/0	1/1
兰科 Orchidaceae	0/0	1/1
红豆杉科 Taxaceae	0/0	1/1
杉科 Taxodiaceae	0/0	1/1
铁角蕨科 Aspleniaceae	0/0	1/1
里白科 Gleicheniaceae	0/0	2/1
石松科 Lycopodiaceae	0/0	1/1

注:NP表示物种数,NG表示属数。

Note: NP. number of species, NG. number of genera.

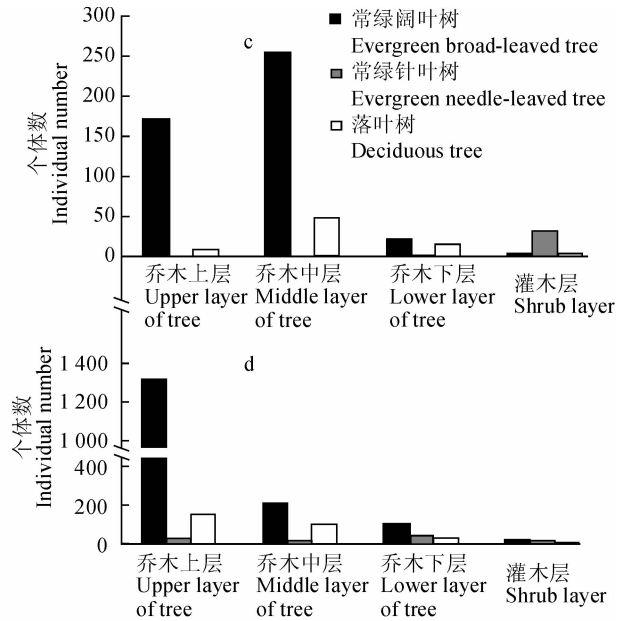
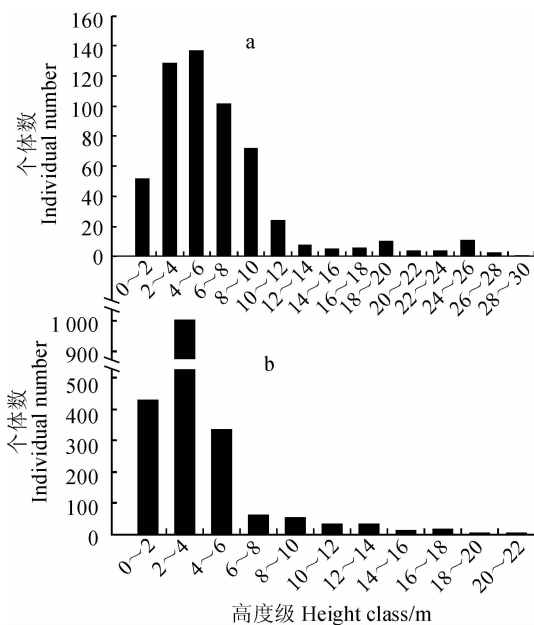
84.16%和 95.03%;杜鹃花科植物在灌木层、乔木下层和乔木中层中都为多度最高的类群,主要为马银花(*Rhododendron ovatum*);山茶科在灌木层和

乔木下层也有较高的多度,主要为尖叶连蕊茶(*Camellia cuspidata*);而南方铁杉在乔木上层占据绝对的多度优势(图 1,c)。梨树洲群落各层常绿树的

表 2 5 处南方铁杉群落种类组成的地理成分比较

Table 2 The Comparison of the geographical elements of five *T. Chinensis* communities^[4,6,40]

分布区类型 Type of distribution	属数/占非世界分布总属数比例 Genus quantity/Proportion/%				
	湖南牛石坪 Niushiping, Hunan	湖南梨树洲 Lishuzhou, Hunan	贵阳高坡 Gaopo, Guiyang	福建光泽 Guangze, Fujian	浙江九龙山 Jiulongshan, Zhejiang
1. 世界广布 Cosmopolitan	—	2/—	3/—	1/—	—
2. 泛热带分布 Pantropic	4/19.05	3/12.00	3/7.89	5/15.63	3/15.00
3. 热带亚洲和热带美洲间断分布 Trop. As. and Trop. Amer.	4/19.05	4/16.00	1/2.63	2/6.25	2/10.00
4. 旧世界热带分布 Old World Trop.	—	—	—	—	—
5. 热带亚洲至热带大洋洲 Trop. As. and Trop. Australia	—	—	3/7.89	2/6.25	—
6. 热带亚洲至热带非洲分布 Trop. As. and Trop. Afr.	—	—	1/2.63	—	—
7. 热带亚洲分布 Trop. As.	2/9.52	4/16.00	5/13.16	3/9.38	3/15.00
8. 北温带分布 N. Temp.	4/19.05	5/20.00	13/34.21	6/18.75	5/25.00
9. 东亚及北美间断 E. As. and N. Amer. Disjuncted	4/19.05	4/16.00	6/15.79	10/31.25	4/20.00
10. 旧世界温带分布 Old World Temp.	—	—	2/5.26	—	—
11. 温带亚洲分布 Temp. As.	—	1/4.00	—	—	—
12. 地中海区 Mediterranea	—	—	—	—	—
13. 中亚 C. As.	—	—	—	—	—
14. 东亚 E. As.	2/9.52	2/8.00	3/7.89	3/9.38	1/5.00
15. 中国特有 Endemic to China	1/4.76	2/8.00	1/2.63	1/3.13	2/10.00
热带成分(2~7) Tropical elements	10/47.62	11/44.00	13/34.21	12/37.50	8/40.00
温带成分(8~15) Temperate elements	11/52.38	14/56.00	25/65.79	20/62.50	12/60.00



a, c. 牛石坪南方铁杉群落; b, d. 梨树洲南方铁杉群落。

图 1 桃源洞南方铁杉群落高度频率分布(a, b)及其垂直结构图(c, d)

a, c. *Tsuga chinensis* community from Niushiping; b, d. *Tsuga chinensis* community from Lishuzhou

Fig. 1 The height class frequency distribution (a, b) and vertical structure (c, d) of *T. chinensis* community from Taoyuandong

相对多度由上自下依次为 97.30%、82.29%、69.63% 和 89.10%；杜鹃花科植物在灌木层和乔木下层为多度最高的类群，主要是鹿角杜鹃 (*Rhododendron latoucheae*) 和背绒杜鹃 (*Rhododendron hypolematosum*)；乔木中层和乔木上层中多度最高的类群为山茶科植物，主要是银木荷 (*Schima argentea*)；南方铁杉在各层都占有一定的比例，多度仅次于杜鹃花科或山茶科植物 (图 1, d)。

3.3 群落物种多样性

由表 3 可知，牛石坪南方铁杉群落乔木层和草本层的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数均大于灌木层，草本层的 Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数略大于乔木层，而 Shannon-Wiener 指数则略低于乔木层；梨树洲南方铁杉群落的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数变化趋势相同，均为草本层 > 乔木层 > 灌木层；分别比较 2 个南方铁杉群落各层的 3 个指数，其差别不大。具体比较每个群落灌木层、乔木下层、乔木中层和乔木上层的三个指数可得：2 个南方铁杉群落的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均为乔木下层 > 乔木中层 > 灌木层 > 乔木上层；牛石坪南方铁杉群落的 Pielou 均匀度指数为乔木中层 > 乔木下层 > 灌木层 > 乔木上层；梨树洲南方铁杉群落的 Pielou 均匀度指数为乔木中层 > 乔木下层 > 乔木上层 > 灌木层，并且乔木层的 3 个亚层均匀度指数变化不大，这与银木荷和南方铁杉在该群落乔木上层分布均匀且数量较多相关 (表 3)。

3.4 群落乔、灌木种群重要值

对 2 个南方铁杉群落的乔、灌木种群重要值分

别进行分析，结果表明：(1) 牛石坪南方铁杉群落乔木层中的优势种群是马银花种群和南方铁杉种群，重要值分别为 24.84 和 16.31；次优势种群是尖叶连蕊茶种群、鹿角杜鹃种群和漆树 (*Toxicodendron vernicifluum*) 种群，重要值都在 5 以上 (表 4)。(2) 牛石坪南方铁杉群落灌木层中的优势种群是马银花种群，重要值为 52.14，高于其余所有种群的重要值之和；次优势种群是尖叶连蕊茶种群和鹿角杜鹃种群，重要值分别为 18.08 和 6.98；南方铁杉在灌木层没有分布 (表 5)。(3) 梨树洲南方铁杉群落乔木层中的优势种群是银木荷种群和南方铁杉种群，重要值分别为 23.98 和 20.85；次优势种群为鹿角杜鹃种群、吴茱萸五加种群和华东山柳 (*Clethra barbinervis*) 种群 (表 6)。(4) 梨树洲南方铁杉群落灌木层中的优势种群是鹿角杜鹃种群和背绒杜鹃种群；次优势种群是华东山柳种群、吴茱萸五加种群、马银花种群和南方铁杉种群，其中南方铁杉种群的重要值为 3.57 (表 7)。

3.5 南方铁杉种群的年龄结构和数量动态

从图 2 可以看出，牛石坪南方铁杉群落中南方铁杉种群的年龄结构为衰退型种群，幼年阶段的个体数量较少，成年个体相对丰富；种群内个体集中分布在第 6 至第 9 龄级，并在第 7 龄级出现个体数量高峰；此外，种群在第 2 龄级、第 12 龄级和 13 龄级出现断层，表明受到过严重的干扰，例如人为砍伐、自然灾害等。而梨树洲南方铁杉群落中南方铁杉种群的年龄结构为增长型种群，个体数随龄级的增加而递减；第 10 到第 13 龄级个体数为 0；第 6 龄级和第 7 龄级出现断层，同样表明存在干扰。

表 3 桃源洞南方铁杉群落物种多样性

Table 3 Species diversity of *T. chinensis* community from Taoyuandong

群落地点-层次 Locality-Layer	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 指数 Pielou index
牛石坪-乔木层 Niushiping-Tree layer	2.287 6	0.819 4	0.686 5
牛石坪-乔木上层 Niushiping-Upper layer of tree	0.862 9	0.360 3	0.443 4
牛石坪-乔木中层 Niushiping-Middle layer of tree	1.662 3	0.717 3	0.721 9
牛石坪-乔木下层 Niushiping-Lower layer of tree	2.111 5	0.788 8	0.664 4
牛石坪-灌木层 Niushiping-Shrub layer	1.248 4	0.520 8	0.486 7
牛石坪-草本层 Niushiping-Herbaceous layer	2.105 4	0.860 1	0.914 4
梨树洲-乔木层 Lishuzhou-Tree layer	2.301 5	0.858 1	0.698 3
梨树洲-乔木上层 Lishuzhou-Upper layer of tree	1.062 9	0.588 8	0.660 4
梨树洲-乔木中层 Lishuzhou-Middle layer of tree	1.809 6	0.764 5	0.685 7
梨树洲-乔木下层 Lishuzhou-Lower layer of tree	2.226 4	0.815 4	0.683 3
梨树洲-灌木层 Lishuzhou-Shrub layer	1.780 3	0.724 7	0.534 3
梨树洲-草本层 Lishuzhou-Herbaceous layer	2.733 0	0.873 9	0.775 0

表 4 牛石坪南方铁杉群落乔木种群重要值

Table 4 Importance values of tree populations in the *T. chinensis* community of Niushiping

种类 Species	相对多度 Relative abundance	相对频率 Relative frequency	相对优势度 Relative dominance	重要值 Important value
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	0.366 9	0.108 7	0.269 5	24.84
南方铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	0.082 7	0.108 7	0.298 1	16.31
尖叶连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	0.149 9	0.076 1	0.068 3	9.81
鹿角杜鹃 <i>Rhododendron latoucheae</i>	0.082 7	0.076 1	0.045 2	6.80
漆树 <i>Toxicodendron vernici fluum</i>	0.064 6	0.065 2	0.053 6	6.11
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodii folia</i>	0.043 9	0.065 2	0.028 4	4.59
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.043 9	0.054 3	0.017 7	3.86
银木荷 <i>Schima argentea</i>	0.002 6	0.010 9	0.093 2	3.56
华东山柳 <i>Clethra barbinervis</i>	0.018 1	0.054 3	0.008 9	2.71
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	0.015 5	0.043 5	0.015 4	2.48
柿树 <i>Diospyros kaki</i>	0.010 3	0.032 6	0.017 6	2.02
木蜡树 <i>Toxicodendron sylvestri</i>	0.010 3	0.032 6	0.007 2	1.67
柃木 <i>Eurya japonica</i>	0.015 5	0.021 7	0.006 4	1.46
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	0.007 8	0.032 6	0.001 8	1.40
羊舌山矾 <i>Symplocos glauca</i>	0.012 9	0.021 7	0.006 4	1.37
青榨槭 <i>Acer davidii</i>	0.010 3	0.021 7	0.003 1	1.17
檫木 <i>Sassafras tzumu</i>	0.005 2	0.021 7	0.006 7	1.12

注:仅列出了重要值大于1的种群。表6、7同。

Note: Tree populations which importance values less than 1.00 are not listed. The same as Table 6 and 7.

表 5 牛石坪南方铁杉群落灌木种群重要值

Table 5 Importance values of shrub populations in the *T. chinensis* community of Niushiping

种类 Species	相对多度 Relative abundance	相对频率 Relative frequency	相对优势度 Relative coverage	重要值 Important value
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	0.663 0	0.256 4	0.645 8	52.17
尖叶连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	0.138 1	0.230 8	0.173 4	18.08
鹿角杜鹃 <i>Rhododendron latoucheae</i>	0.044 2	0.128 2	0.036 9	6.98
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.038 7	0.051 3	0.051 7	4.72
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	0.022 1	0.076 9	0.014 8	3.79
柃木 <i>Eurya japonica</i>	0.022 1	0.051 3	0.011 1	2.82
厚叶红淡比 <i>Cleyera pachyphylla</i>	0.016 6	0.051 3	0.011 1	2.63
漆树 <i>Toxicodendron vernici fluum</i>	0.005 5	0.025 6	0.029 5	2.02
羊舌山矾 <i>Symplocos glauca</i>	0.016 6	0.025 6	0.011 1	1.78
南烛 <i>Vaccinium bracteatum</i>	0.011 0	0.025 6	0.005 5	1.41
青榨槭 <i>Acer davidii</i>	0.011 0	0.025 6	0.003 7	1.35
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodii folia</i>	0.005 5	0.025 6	0.003 7	1.16
木姜子 <i>Litsea pungens</i>	0.005 5	0.025 6	0.001 8	1.10

注:包括所有的灌木种群。

Note: Including all the shrub populations.

梨树洲南方铁杉种群的静态生命表(表8)和存活曲线(图3)表明:(1)梨树洲南方铁杉种群结构存在一定的波动性;(2)第3龄级是其存活的一个关键时期,表现为其存活数量迅速下降(图3,a)以及死

亡率和消失率达到第一个峰值(图3,b);(3)在第3龄级以前,该种群的生存率、累积死亡率和危险率变化显著,生存率锐减而累积死亡率和危险率骤增(图3,c,d);(4)到第5龄级以后,生存率和死亡率变化

表 6 梨树洲南方铁杉群落乔木种群重要值

Table 6 Importance values of tree populations in the *T. chinensis* community of Lishuzhou

种类 Species	相对多度 Relative abundance	相对频率 Relative frequency	相对优势度 Relative dominance	重要值 Important value
银木荷 <i>Schima argentea</i>	0.175 5	0.094 5	0.449 4	23.98
南方铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	0.133 5	0.126 0	0.366 0	20.85
鹿角杜鹃 <i>Rhododendron latoucheae</i>	0.245 0	0.086 6	0.033 4	12.17
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiiifolia</i>	0.138 9	0.126 0	0.032 4	9.91
华东山柳 <i>Clethra barbinervis</i>	0.100 5	0.126 0	0.024 5	8.37
多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis multinervis</i>	0.031 1	0.055 1	0.012 2	3.28
背绒杜鹃 <i>Rhododendron hypobletatosum</i>	0.029 3	0.047 2	0.003 0	2.65
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	0.029 3	0.039 4	0.002 4	2.37
台湾松 <i>Pinus morrisonicola</i>	0.007 3	0.031 5	0.021 0	1.99
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.009 1	0.031 5	0.016 1	1.89
鼠刺 <i>Itea chinensis</i>	0.014 6	0.039 4	0.002 3	1.88
羊舌山矾 <i>Symplocos glauca</i>	0.009 1	0.039 4	0.006 6	1.84
厚叶红淡比 <i>Cleyera pachyphylla</i>	0.016 5	0.023 6	0.013 8	1.80

表 7 梨树洲南方铁杉群落灌木种群重要值

Table 7 Importance values of shrub populations in the *T. chinensis* community of Lishuzhou

种类 Species	相对多度 Relative abundance	相对频率 Relative frequency	相对优势度 Relative dominance	重要值 Important value
鹿角杜鹃 <i>Rhododendron latoucheae</i>	0.397 9	0.117 6	0.387 3	30.09
背绒杜鹃 <i>Rhododendron hypobletatosum</i>	0.327 7	0.110 3	0.231 3	22.31
华东山柳 <i>Clethra barbinervis</i>	0.078 6	0.110 3	0.109 9	9.96
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiiifolia</i>	0.029 5	0.073 5	0.043 3	4.88
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	0.032 3	0.066 2	0.037 3	4.52
南方铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	0.017 5	0.073 5	0.016 1	3.57
尖萼毛柃 <i>Eurya acutise-pala</i>	0.014 7	0.066 2	0.009 1	3.00
厚叶红淡比 <i>Cleyera pachyphylla</i>	0.017 5	0.036 8	0.035 5	2.99
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	0.007 7	0.051 5	0.010 8	2.33
鼠刺 <i>Itea chinensis</i>	0.012 6	0.036 8	0.010 4	1.99
多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis multinervis</i>	0.006 3	0.044 1	0.007 3	1.92
羊舌山矾 <i>Symplocos glauca</i>	0.003 5	0.036 8	0.006 7	1.56
格药柃 <i>Eurya muricata</i>	0.013 3	0.014 7	0.014 5	1.42
显脉新木姜 <i>Neolitsea phanerophlebia</i>	0.008 4	0.022 1	0.010 4	1.36
银木荷 <i>Schima argentea</i>	0.005 6	0.022 1	0.011 1	1.29

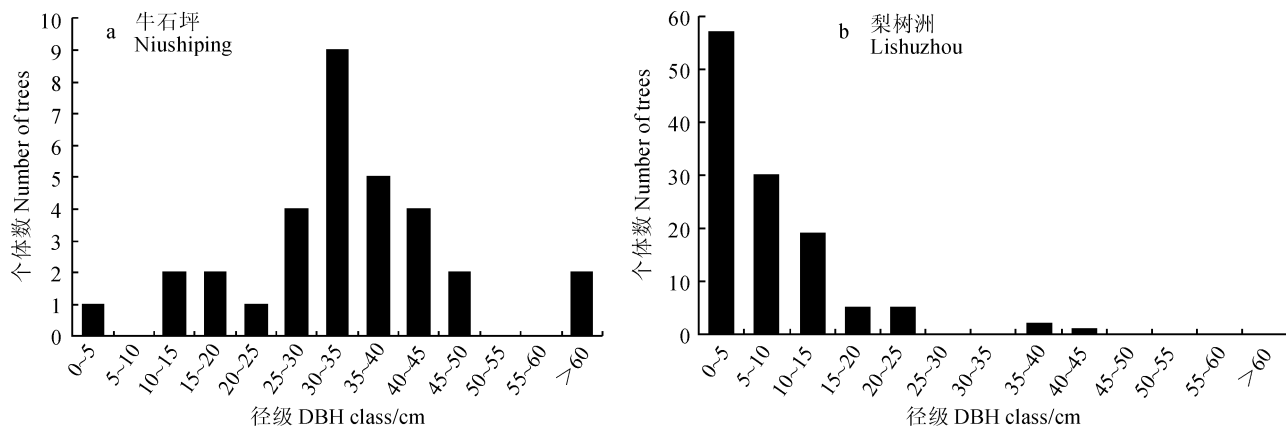


图 2 桃源洞 2 个南方铁杉种群年龄结构

Fig. 2 The age class frequency distribution of *T. chinensis* population from Taoyuandong

表 8 梨树洲南方铁杉种群静态生命表

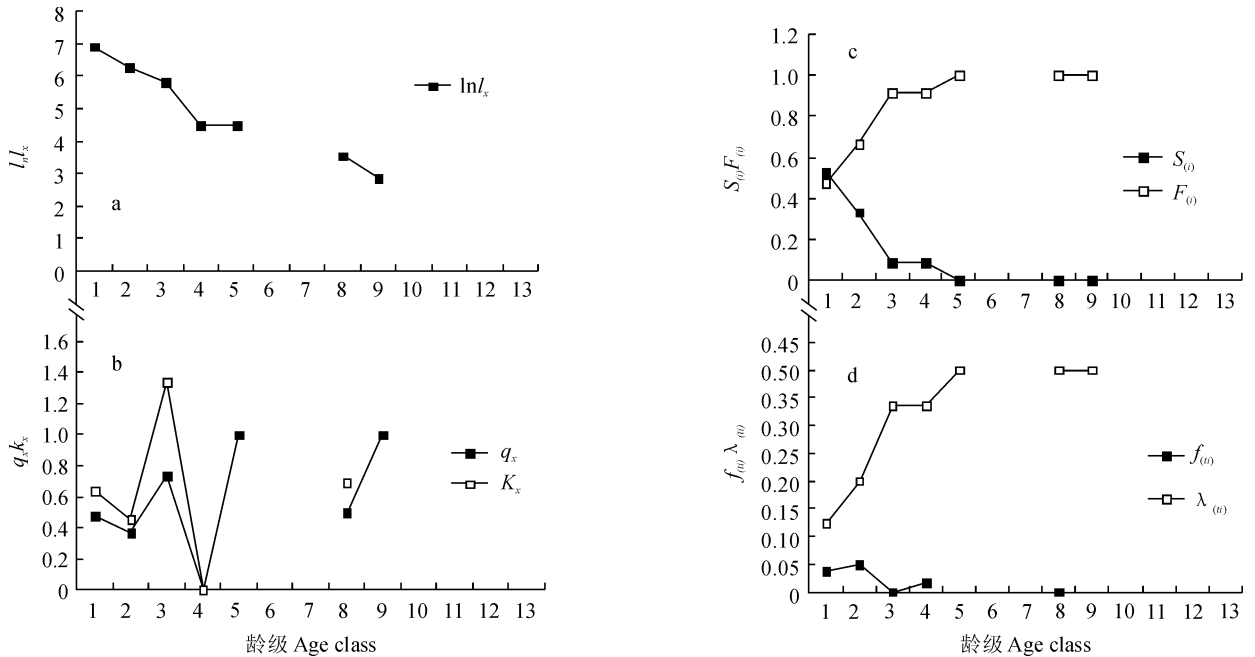
Table 8 Static life table of *T. a chinensis* population from Lishuzhou

龄级 Age class	径级 DBH class	组中值 Mean value	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
1	0~5	2.5	57	1 000	6.908	474	0.474	763	1 588	1.588	0.642	0.526
2	5~10	7.5	30	526	6.266	193	0.367	430	825	1.567	0.457	0.633
3	10~15	12.5	19	333	5.809	246	0.737	211	395	1.184	1.335	0.263
4	15~20	17.5	5	88	4.474	0	0.000	88	184	2.100	0.000	1.000
5	20~25	22.5	5	88	4.474	88	1.000	44	96	1.100	/	0.000
6	25~30	27.5	0	0	/	0	/	0	53	/	/	/
7	30~35	32.5	0	0	/	-35	/	18	53	/	/	/
8	35~40	37.5	2	35	3.558	18	0.500	26	35	1.000	0.693	0.500
9	40~45	42.5	1	18	2.865	18	1.000	9	9	0.500	/	0.000
10	45~50	47.5	0	0	/	0	/	0	0	/	/	/
11	50~55	52.5	0	0	/	0	/	0	0	/	/	/
12	55~60	57.5	0	0	/	0	/	0	0	/	/	/
13	>60	70.0	0	0	/	0	/	0	0	/	/	/

注:DBH. 胸径; a_x . 存活数; l_x . 存活量; d_x . 死亡数; q_x . 死亡率; L_x . 区间寿命; T_x . 总寿命; e_x . 期望寿命; K_x . 消失率; S_x . 存活率。

Note: DBH. Diameter at breast height; a_x . Survival; l_x . Survival quantity; d_x . Death number; q_x . Mortality rate; L_x . Span life; T_x .

Total life; e_x . Life expectancy; K_x . Vanish rate; S_x . Survival rate.



a. 存活曲线; b. 死亡率(q_x)和消失率(K_x)曲线; c. 生存率[$S_{(t)}$]和累积死亡率[$F_{(t)}$]曲线; d. 死亡密度[$f_{(t)}$]和危险率[$\lambda_{(t)}$]曲线

图 3 梨树洲南方铁杉种群生存分析曲线

a. Survival curve; b. Mortality rate (q_x) and vanish rate (K_x) value curves; c. Survival rate [$S_{(t)}$] and cumulative mortality rate [$F_{(t)}$] functional curves; d. Mortality density [$f_{(t)}$] and hazard rate [$\lambda_{(t)}$] functional curves

Fig. 3 Survival analysis curves of *T. chinensis* population from Lishuzhou

趋于平缓,但由于干扰的存在,使得第 5 到第 6 龄级的存活率为 0(图 3, c)。

总的来说,牛石坪南方铁杉种群的个体数明显少于梨树洲南方铁杉种群的个体数,前者仅有南方

铁杉 32 株,后者共有南方铁杉 98 株。根据南方铁杉木解析资料^[25],第 7 龄级植株树龄在 100 年左右,表明 100 年前牛石坪南方铁杉种群存在自我更新。然而,由于低龄级个体的缺乏和种群总体数量

的不足,牛石坪南方铁杉种群可因为高龄级个体的生理衰老而不断死亡和低龄级个体的缺失而呈现更新困难和衰亡的趋势。梨树洲南方铁杉种群中低龄级个体数较丰富,年龄结构分布基本连续,理论上可实现自我更新。但是,根据生存分析,第3龄级是其存活的一个关键时期,群落的郁闭度为其限制因子,并且梨树洲南方铁杉种群还较年轻,其是否能自然更新还存在一定的挑战。此外,两个南方铁杉种群均有较严重的干扰现象,成为影响高龄级个体数量的一个重要原因。

4 讨论

桃源洞自然保护区中牛石坪南方铁杉群落共有维管植物 13 科 21 属 26 种,梨树洲南方铁杉群落共有维管植物 22 科 30 属 36 种。地理成分分析表明温带成分明显高于热带成分,表现为温带向热带过渡的特性,也体现了该群落的亚热带山地性质。2 个群落中常绿树种占优势,整体外貌有一定的季相变,春夏暗绿色,秋冬淡黄绿色。群落垂直结构可分为乔木层、灌木层和草本层,其中乔木层又可分为 3 亚层。2 个南方铁杉群落的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均为乔木下层 > 乔木中层 > 灌木层 > 乔木上层, Pielou 均匀度指数为乔木中层和乔木下层 > 乔木上层和灌木层。

牛石坪南方铁杉群落乔木层的优势种群为马银花种群和南方铁杉种群,次优势种群是尖连蕊茶种群、鹿角杜鹃种群和漆树种群;灌木层优势种群是马银花种群,次优势种群是尖连蕊茶种群和鹿角杜鹃种群。其中,南方铁杉种群几乎全部的个体都分布于乔木上层,是乔木上层的压倒性优势植物。根据牛石坪南方铁杉种群的年龄结构分布特征,表明其属于衰退型种群。该南方铁杉种群不论是低龄级个体还是种群的总体数量都严重不足,难以实现自然

更新。

梨树洲南方铁杉群落乔木层中的优势种群是银木荷种群和南方铁杉种群,次优势种群为鹿角杜鹃种群、吴茱萸五加种群和华东山柳种群;灌木层优势种群是鹿角杜鹃种群和背绒杜鹃种群,次优势种群是华东山柳种群、吴茱萸五加种群、马银花种群和南方铁杉种群。南方铁杉在各层均有分布,乔木中层有 42 株、灌木层有 25 株、乔木下层有 17 株、乔木上层有 14 株。梨树洲南方铁杉种群的年龄结构分布属于增长型,低龄级个体数较丰富,年龄结构分布基本连续,理论上可实现自我更新。

南方铁杉作为国家 II 级重点保护植物,加强对它的保护具有很高的学术价值和实际意义。南方铁杉濒危的原因主要有三点:第一是南方铁杉的种子休眠期较长且幼苗呈聚集生长,导致种群更新较慢和幼苗死亡率较高;二是南方铁杉为喜光树种,在其生长的各个阶段都需要充足的阳光,因此群落的郁闭度是其主要的限制因子之一;三是南方铁杉多散生于针阔混交林中,为小种群,自然灾害和人为破坏带来的伤害可能是毁灭性的^[1]。在本研究的 2 个南方铁杉群落中,牛石坪南方铁杉种群虽然是乔木层优势种群,但已经处于衰退阶段,随着南方铁杉成年个体的不断死亡以及幼苗的缺乏,呈现更新困难和衰亡的趋势。而梨树洲南方铁杉种群目前生长旺盛,具有一定的更新率,但该群落郁闭度高,且有鹿角杜鹃等耐阴种群的竞争,自我更新存在一定的挑战。总体来说,南方铁杉种群早期的自我更新限制因子主要是郁闭度,后期个体数量减少的主要原因是人为砍伐等干扰。因此,建议对桃源洞南方铁杉群落加强后续监测,如有必要应进行人为干扰干预以降低林地郁闭度和加强群落通风条件。此外,还应加强保护性标识牌的使用和警示。

致谢: 中山大学 2012 级生物学类本科生黄玉梅、杜静静、刘子豪,研究生许可旺、赵万义,首都师范大学刘羽霞、阿尔孜古力,桃源洞自然保护区孟长庆等参加了野外调查,特此鸣谢!

参考文献:

- [1] 张志祥. 珍稀濒危植物南方铁杉研究进展[J]. 生物学教学, 2011, 36(6): 3-5.
ZHANG Z X. Research advance of *Tsuga tchekiensis*[J]. *Biological Teaching*, 2011, 36(6): 3-5.
- [2] 张志祥, 刘鹏, 刘春生, 等. 浙江九龙山南方铁杉(*Tsuga tchekiensis*)群落结构及优势种群更新类型[J]. 生态学报,

2008, 28(9): 4 547-4 558.

- ZHANG Z X, LIU P, LIU C S, *et al.* The structure characteristics and dominant population regeneration types of *Tsuga tchekiensis* communities in the Jiulongshan National Natural Reserve of Zhejiang Province[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2008, 28(9): 4 547-4 558.
- [3] 陈璟. 莽山自然保护区南方铁杉种群物种多样性和稳定性

- 研究[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(12): 81-85.
- CHEN J. The Species Diversity and Stability of *Tsuga tcheki-angensis* Community in Mang Mountain Nature Reserve[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(12): 81-85.
- [4] 冯祥麟, 胡刚, 刘正华. 贵阳高坡南方铁杉群落特征及种群动态调查研究[J]. 贵州林业科技, 2011, **39**(2): 26-29.
- FENG X L, HU G, LIU Z H. Research on the Community Characteristics and Population Dynamics of *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* on Gaopo in Guiyang City[J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2011, **39**(2): 26-29.
- [5] 谢琼中. 南方铁杉群落物种多样性及乔木优势种生态位初步研究[J]. 天津农业科学, 2011, **17**(2): 133-136.
- XIE Q Z. Primary Study on Species Diversity and Niche Characteristics of Dominant Tree Species in *Tsuga tchekiangensis* Community[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2011, **17**(2): 133-136.
- [6] 谢旺生. 福建光泽南方铁杉群落植物组成与多样性分析[J]. 福建林业科技, 2012, **39**(3): 8-14.
- XIE W S. Plant Species Composition and Diversity of *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* Community in Guangze, Fujian, China[J]. *Jour of Fujian Forestry Science and Technology*, 2012, **39**(3): 8-14.
- [7] 杜道林, 刘玉成, 刘川华. 茂兰喀斯特山地南方铁杉种群结构和动态初探[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1994, **19**(2): 169-174.
- DU D L, LIU Y C, LIU C H. A priliminary study on the structures and dynamics of *Tsuga techekiangensis* populations in Karst Mountain of Maolan[J]. *Journal of Southwest China Normal University*(Natural Science) Natual Science Edition, 1994, **19**(2): 169-174.
- [8] 黄宪刚, 谢强. 猫儿山南方铁杉种群结构和动态的初步研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2000, **18**(2): 86-90.
- HUANG X G, XIE Q. A priliminary study on the structures and dynamics of *Tsuga techekiangensis* population on Maors-han mountain[J]. *Journal of Guangxi Normal University* Natual Science Edition, 2000, **18**(2): 86-90.
- [9] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 珍稀濒危植物南方铁杉种群动态研究[J]. 武汉植物学研究, 2003, **21**(5): 401-405.
- FENG L, HONG W, WU C Z, *et al.* Study on the dynamics of the endangered plant population of *Tsuga tchekiangensis* [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, **21**(5): 401-405.
- [10] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 南方铁杉种群结构动态与空间分布格局[J]. 福建林学院学报, 2008, **28**(2): 110-114.
- FENG L, HONG W, WU C Z, *et al.* Structure dynamics and spatial distribution pattern of population of *Tsuga tcheki-angensis*[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2008, **28**(2): 110-114.
- [11] 郭连金, 洪森荣, 夏华炎. 武夷山自然保护区濒危植物南方铁杉种群数量动态分析[J]. 上饶师范学院学报, 2006, **26**(6): 74-78.
- GUO L J, HONG S R, XIA H Y. Analysis on the Number Dynamic of *Tsuga Tchekiangensis* Population in Wuyishan Nature Reserve[J]. *Journal of Shangrao Normal College*, 2006, **26**(6): 74-78.
- [12] 张志祥, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(5): 1 146-1 156.
- ZHANG Z X, LIU P, CAI M Z, *et al.* Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered *tsuga tchekiangensis* in Jiulongshan Nature Reserve of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(5): 1146-1156.
- [13] 张志祥, 刘鹏, 等. 珍稀濒危植物南方铁杉种群结构与空间分布格局研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29**(1): 7-14.
- ZHANG Z X, LIU P, *et al.* Studies on the population structure and spatial distribution pattern of *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis*[J]. *Jour. of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2009, **29**(1): 7-14.
- [14] 何建源, 卞羽, 吴焰玉, 等. 不同坡向濒危植物南方铁杉的分布格局[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(13): 122-125.
- HE J Y, BIAN Y, WU Y Y, *et al.* Spatial distribution pattern of the endangered plant *Tsuga chekiangensis* in Different Aspect[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(13): 122-125.
- [15] 王大为. 莽山南方铁杉种群格局分布格局研究[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(1): 74-77.
- WANG D L. Distribution pattern of *Tsuga tchekiangensis* populations in Mang Mountain[J]. *Chinses Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(1): 74-77.
- [16] 李林, 魏识广, 黄忠良, 等. 猫儿山两种孑遗植物的更新状况和空间分布格局分析[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(2): 144-150.
- LI L, WEI S G, HUANG Z L, *et al.* Regenerative condition and analysis of spatial distribution pattern of two relic plants in Mao'ershan Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(2): 144-150.
- [17] 杨清培, 金志农, 裘利洪, 等. 江西武夷山南方铁杉更新格局及代际关联性分析[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(4): 939-945.
- YANG Q P, JIN Z N, QIU L H, *et al.* Regeneration pattern and intergeneration association of *Tsuga chinensis* var. *tcheki-angensis* in Jiangxi Wuyishan National Nature Reserve[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 939-945.
- [18] 刘春生, 刘鹏, 张志祥, 等. 九龙山南方铁杉群落物种多样性及乔木种间联结性[J]. 生态环境, 2008, **17**(4): 1 533-1 540.
- LIU C S, LIU P, ZHANG Z X, *et al.* Species diversity and interspecific association of trees of *Tsuga tchekiangensis* communities in Jiulong mountain[J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(4): 1 533-1 540.
- [19] 何建源, 荣海, 吴焰玉, 等. 武夷山南方铁杉群落乔木层种间联结研究[J]. 福建林学院学报, 2010, **30**(2): 169-173.
- HE J Y, RONG H, WU Y Y, *et al.* Study on interspecific association of main populations in arborous layer of a *Tsuga tchekiangensis* community in Wuyishan National Nature Reserve of Fujian Province[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2010, **30**(2): 169-173.
- [20] 罗金旺. 福建光泽天然林中南方铁杉的种内与种间竞争[J]. 林业科技开发, 2011, **25**(4): 71-74.
- LUO J W. Intra and interspecific competition in *Tsuga*

- chinensis* var. *tchekiensis* in a natural forest in Guangze, Fujian, China[J]. *China Forestry Science & Technology*, 2011, **25**(4): 71-74.
- [21] 赵峰. 莽山南方铁杉群落种间关系研究[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(31): 68-72.
ZHAO F. The relationship of species in *Tsuga tchekiensis* community in Mangshan Mountain Natural Reserve[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(31): 68-72.
- [22] 刘春生, 刘鹏, 张志祥, 等. 九龙山濒危植物南方铁杉的生态位研究[J]. 武汉植物学研究, 2009, **27**(1): 55-61.
LIU C S, LIU P, ZHANG Z X, et al. The niche characteristics of endangered plant *Tsuga tchekiensis* in Jiulongshan National Nature Reserve of Zhejiang Province[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, **27**(1): 55-61.
- [23] 李晓铁. 猫儿山林区南方铁杉生长调查初报[J]. 广西林业科技, 1992, **21**(1): 24-26.
LI X T. Primary research of *Tsuga tchekiensis* in Mao'ershan Mountain [J]. *Guangxi Forestry Science and Technology*, 1992, **21**(1): 24-26.
- [24] 罗金旺. 福建光泽南方铁杉天然林的生长规律与生物量[J]. 福建林学院学报, 2011, **31**(2): 156-160.
LUO J W. Growth and biomass of *Tsuga chinensis* var. *tchekiensis* in a natural forest in Guangze, Fujian, China[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2011, **31**(2): 156-160.
- [25] 祁红艳, 金志农, 等. 江西武夷山南方铁杉生长规律及更新困难的原因解释[J]. 江西农业大学学报, 2014, **36**(1): 137-143.
QI H Y, JIN Z N, et al. Growing law and cause of poor regeneration of *Tsuga chinensis* var. *tchekiensis* in Jiangxi Wuyishan National Nature Reserve [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, **36**(1): 137-143.
- [26] 张强, 郭传友, 张兴旺, 等. 基于光合作用和抗氧化机制的南方铁杉和褐叶青冈越冬策略研究[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, **35**(2): 200-207.
ZHANG Q, GUO C Y, ZHANG X W, et al. Photosynthesis and antioxidant defense strategies in overwintering plants of *Tsuga chinensis* and *Cyclobalanopsis stewardiana* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, **35**(2): 200-207.
- [27] 张志祥, 刘鹏, 等. 不同群落类型下南方铁杉金属元素含量差异及其与土壤养分因子的关系[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(5): 505-516.
ZHANG Z X, LIU P, et al. Metal element contents of *Tsuga chinensis* var. *tchekiensis* in different community types and its relationship with soil nutrient factors in eastern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(5): 505-516.
- [28] 吴九玲, 钱晓鸣, 刘燕. 南方铁杉外生菌根的扫描电镜观察[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, **40**(6): 1 337-1 341.
WU J L, QIAN X M, LIU Y. SEM-observation of ectomycorrhizal outer surface of *Tsuga chinensis* var. *tchekiensis* (Flous) Cheng [J]. *Journal of Xiamen University* (Natural Science Edition), 2001, **40**(6): 1 337-1 341.
- [29] 钱晓鸣, 黄耀坚, 等. 武夷山自然保护区南方铁杉外生菌根生物多样性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2007, **36**(2): 180-185.
QIAN X M, HUANG Y J, et al. Biodiversity of the ectomycorrhiza on the rare and endangered tree species *Tsuga chinensis tchekiensis* (Flous) Cheng in Wuyishan Nature Reserve [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (Natural Science Edition), 2007, **36**(2): 180-185.
- [30] 李晓铁, 玉伟朝, 罗远周, 等. 南方铁杉扦插繁殖技术[J]. 林业实用技术, 2008, 6: 21-22.
LI X T, YU W C, LUO Y Z, et al. Cutting propagation techniques of *Tsuga tchekiensis* [J]. *Practical Forestry Technology*, 2008, 6: 21-22.
- [31] 何建源, 卞羽, 吴焰玉, 等. 南方铁杉林林隙自然干扰规律[J]. 西南林学院学报, 2009, **29**(6): 7-10.
HE J Y, BIAN Y, WU Y Y, et al. Study on the law of natural disturbance in the gaps of *Tsuga chekiensis* fores [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2009, **29**(6): 7-10.
- [32] 侯碧清. 湖南酃县桃源洞自然保护区综合考察报告[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993. 3-20.
- [33] 谭益民, 吴章文. 桃源洞国家级自然保护区的生态状况[J]. 林业科学, 2009, **45**(7): 52-58.
TAN Y M, WU Z W. Ecological status of taoyuandong national Nature Reserve [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(7): 52-58.
- [34] 王伯荪, 余世孝, 彭少麟, 等. 植物群落学实验手册[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1996. 1-56.
- [35] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, **15**(3): 268-277.
MA K P, HUANG J H, YU S L, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(3): 268-277.
- [36] 江洪. 云杉种群生态学研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [37] WRETEN S. Field and Laboratory Exercises in Ecology [M]. London: Edward Arnad Publishers Limited, 1980.
- [38] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 等. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用[J]. 生态学报, 1991, **11**(2): 153-158.
YANG F X, WANG S Q, XU H G, et al. The theory of survival analysis and its application to life table [J]. *Acta Ecologica Sinica*, **11**(2): 153-158.
- [39] 陈灵芝, 孙航, 郭柯. 中国植物区系及植被地理[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 413-438.
- [40] 张志祥. 九龙山自然保护区珍稀濒危植物南方铁杉种群生态学研究[D]. 浙江金华: 浙江师范大学, 2009.