

人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响

王媚臻^a, 齐锦秋^{a,b}, 魏丽萍^a, 齐芳^a, 周培^a, 梁万友^a, 郝建锋^{a,c*}

(四川农业大学, a. 林学院; b. 木材工业与家具工程重点实验室; c. 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130)

摘要: 为探究人为干扰对栲树群落的影响, 采用典型样地法研究不同程度人为干扰对碧峰峡栲树(*Castanopsis fargesii*)次生林群落的物种多样性和土壤理化性质的影响。结果表明, 碧峰峡栲树群落共有维管植物 148 种, 隶属 60 科 106 属。乔木层和草本层物种多样性指数随干扰强度的加强先增加后减小, 灌木层物种多样性水平最高。乔木层优势种以栲树、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等为主, 灌木层物种丰富, 优势种较多, 草本层优势种数量为中度干扰 > 轻度干扰 > 重度干扰。土壤有机碳、钾含量和含水量与群落物种多样性水平显著相关($P < 0.05$)。中度干扰在一定程度上能够促进碧峰峡栲树群落物种多样性并改善土壤性质, 土壤有机碳、钾含量和含水量对物种多样性有显著影响。

关键词: 人为干扰; 栲树; 物种多样性; 土壤

doi: 10.11926/jtsb.3843

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of *Castanopsis fargesii* Secondary Forest

WANG Mei-zhen^a, QI Jing-qiu^{a,b}, WEI Li-ping^a, QI Fang^a, ZHOU Pei^a, LIANG Wan-you^a, HAO Jian-feng^{a,c*}

(a. College of Forestry; b. Key Laboratory of Wood Industry and Furniture Engineering; c. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to understand the effect of human disturbance on *Castanopsis fargesii* secondary forest community in Bifengxia, the species diversity and soil physiochemical properties of *C. fargesii* community under human disturbances at different degree were studied by using typical plots methods. The results showed that there were 148 vascular species in community, belonging to 60 families and 106 genera. With intensifying disturbance, the diversity indices in tree and herb layer increased at first and then declined, and the species diversity in shrub layer was the highest. The dominant species in tree layer were *C. fargesii* and *Cunninghamia lanceolata*, and the shrub layer is rich in species with many dominant species, and the dominant species number in herb layer was in the order of middle disturbance > slight disturbance > severe disturbance. There were significant correlation among the contents of soil organic carbon, soil potassium and soil moisture and the level of species diversity ($P < 0.05$). Therefore, it was suggested that the species diversity and soil quality of *C. fargesii* community in Bifengxia could be promoted under middle disturbance and the contents of soil organic carbon, soil potassium and soil moisture had related significantly with species diversity.

收稿日期: 2017-10-30

接受日期: 2018-01-16

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金项目(15ZB0020); 国家自然科学基金项目(31370628); 四川农业大学科研兴趣培养项目(ky2016188)资助

This work was supported by the General Project for Natural Science of Department of Education in Sichuan Province (Grant No. 15ZB0020); the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31370628), and the Project for Research Interest Cultivation in Sichuan Agricultural University (Grant No. ky2016188).

作者简介: 王媚臻(1997-), 女, 在读本科生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 18784589908@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: haojf2005@aliyun.com

Key words: Human disturbance; *Castanopsis fargesii*; Species diversity; Physiochemical property; Soil

物种多样性是群落的基础特征^[1], 是生物多样性的本质^[2-4], 研究物种多样性有助于更充分地了解群落的动态变化和发展趋势^[5-6]。目前生物多样性的减少已引起广泛重视^[7]。土壤提供植物吸收水分和矿物质的基础, 具有重要的生态功能^[8-10]。植物群落和土壤是一个有机整体^[11], 土壤空间异质性会影响群落的演替过程, 而森林植被的动态变化会影响土壤的形成^[12]。人为干扰会改变光照、温度、水分和养分等森林环境条件, 引起森林土壤理化性质的改变^[13], 影响群落物种结构和林内生物多样性, 并可能导致生态系统功能退化^[14]。

目前我国原始森林遭受严重破坏, 天然次生林面积急剧增加, 成为森林资源的主体。与原始林相比, 次生林结构单一, 缓冲和反馈调节能力弱, 但其生态功能还是远远大于人工林。四川碧峰峡自然植被组成为亚热带季雨式偏湿型常绿阔叶林, 空气质量国家 I 级, 是多学科研究的天然“实验室”, 动植物资源丰富, 是大熊猫、金丝猴出没之地^[15], 具有重要的生物多样性保护和科研价值, 但持续的人类活动干扰已对其天然次生林造成一定的影响和破坏。了解不同强度人为干扰对碧峰峡物种多样性和土壤理化性质的影响, 将为碧峰峡风景区的研究和保护提供依据和参考, 并且可以通过适度的人为干预促进其物种多样性向良性方向发展, 形成与顶级群落相似的结构特征或加速其恢复为原始林的自然演替进程, 使其实现更大的生态和社会价值。

1 研究区概况

碧峰峡(30°03'~30°05' N, 102°57'~103°07' E)位于四川盆地西部和康藏高原的东部边缘, 海拔 780~800 m, 处于亚热带偏北缘山地季风气候区, 年平均温度 16.49℃, 热量充足, 雨量丰沛, 云雾多, 日照少, 相对湿度平均 80%以上, 土壤以山地黄壤为主。原始植被为常绿阔叶林带, 主要以山矾科(Symplocaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)等为主。碧峰峡风景区野生动植物资源丰富, 峡区内森林植被覆盖率高, 环境优美, 但随着旅游业的发展以及当地居民拾薪砍伐树木等人为干扰, 其植被群落发生演替, 当前主要形成栲树(*Castanopsis fargesii*)、木荷(*Schima superba*)常绿阔

叶混交次生林。

2 研究方法

2.1 样地的选择与设置

经过实地调查, 参照鲁庆彬等^[16]的方法, 设置 3 种人为干扰强度: (1) 轻度干扰, 人为干扰轻微, 林内人为踏入较少, 林相丰富, 郁闭度 0.8~0.9, 距核心景区 700~800 m; (2) 中度干扰, 人为活动频率低, 干扰不严重, 林下植被遭受轻度践踏, 郁闭度 0.7~0.8, 距核心景区 400~500 m; (3) 重度干扰, 游客量大, 樵采、放牧等人为破坏现象严重, 林内植物生长破坏较大, 郁闭度 0.6~0.7, 距核心景区 100~200 m。

参照方精云^[16]的方法, 采用典型样地法, 在调查区内轻度、中度、重度干扰类型区域各设置 4 块林相整齐, 立地条件大致相同的样地, 面积均为 20 m × 30 m, 共 12 块(表 1)。每个样地运用“相邻格子法”等分为 6 个 10 m × 10 m 的乔木样方, 测量并记录各样方内乔木(DBH ≥ 3 cm)的物种名称、数量、高度及冠幅, 并沿样地对角线设置 6 个 5 m × 5 m 的灌木样方和 12 个 1 m × 1 m 的草本样方, 测量并记录灌木样方内所有灌木(DBH < 3 cm)和草本样方内全部草本的种类、株数或丛数、高度及盖度。

2.2 物种多样性的测定

采用 α 多样性指数综合评估群落物种多样性水平。乔木层重要值(IV)=(相对密度+相对显著度+相对频度)/3; 灌木层、草本层重要值(IV)=(相对密度+相对盖度+相对频度)/3; 丰富度指数(D)用相对物种丰富度表示: $D=S$ 。

$$\text{Simpson 指数(优势度指数): } H' = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数: } H = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J_{sw} = \frac{-\sum_{i=1}^S P_i \log P_i}{\log S}$$

式中, P_i 为第 i 种的个体数 n_i 占调查物种个体总数 n 的比例, 即 $P_i = n_i/n$; $i=1, 2, 3, \dots, S$, S 为物种数。

2.3 土壤取样及测定方法

采用对角线五点法, 在调查区取 0~10 cm 土层

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sample plots

编号 No.	海拔 (m) Altitude	坡度 (°) Slope	坡向 (°) Aspect	平均胸径 (cm) Mean diameter	平均树高 (m) Mean height	密度 (ind. hm ⁻²) Density	郁闭度 Canopy density	干扰强度 Disturbance intensity
1	1 172.0	8.5	NE57	11.4	10.3	2 125	0.90	轻度 Slight
2	1 169.8	7.6	SE33	11.8	10.8	2 125	0.85	轻度 Slight
3	1 160.6	9.2	NE5	12.7	12.3	2 100	0.88	轻度 Slight
4	1 161.2	8.3	SE30	9.4	10.5	2 105	0.85	轻度 Slight
5	1 137.2	6.5	SE32	15.1	12.9	2 200	0.79	中度 Middle
6	1 142.5	7.1	NE54	13.1	11.6	2 200	0.70	中度 Middle
7	1 130.1	5.6	NE51	12.0	10.3	2 300	0.70	中度 Middle
8	1 148.9	6.7	SE34	11.1	9.2	1 900	0.75	中度 Middle
9	1 123.4	10.5	SE39	15.6	9.7	1 675	0.65	重度 Severe
10	1 125.6	10.9	SE39	16.3	12.8	1 850	0.67	重度 Severe
11	1 132.3	9.7	SE44	16.0	13.5	2 075	0.69	重度 Severe
12	1 123.7	9.9	SE41	11.4	11.6	1 850	0.55	重度 Severe

混合土样带回实验室,待土样风干后,先剔除较大的植物残体和石碴,再取 100 g 土样过 2 mm 孔径尼龙筛,接着用四分法取出部分土样,连续研磨直至全部通过 0.25 mm 孔径尼龙筛,并将研磨后的样品混匀、装袋保存、密封待测。

采用烘干法测土壤含水量;电位法测土壤 pH;高氯酸-硫酸硝化凯氏定氮法测土壤全氮含量;碱熔-铝锑抗比色法测全磷含量;盐酸-硫酸浸提法测速效磷含量;重铬酸钾-硫酸消化法测有机质含量;酸溶-火焰光度法测全钾含量;乙酸铵提取-火焰分光光度法测速效钾含量^[17]。

2.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件中的单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验不同干扰强度下栲树次生林群落各层次多样性指数的差异显著性($P=0.05$),采用 Origin 8.0 和 Excel 2010 软件制作图表。

3 结果和分析

3.1 人为干扰对物种多样性的影响

对物种组成的影响 据野外调查(图 1),栲树次生林群落以山茶科(Theaceae)、樟科(Lauraceae)、山矾科(Symplocaceae)、壳斗科(Fagaceae)、百合科(Liliaceae)等植物为主。群落各层次的物种组成不同,其中乔木层有 33 种,隶属 14 科 22 属,以山茶科、壳斗科、山矾科、樟科等为主;灌木层有 89 种,隶属 36 科 60 属,以山茶科、蔷薇科(Rosaceae)、

樟科、山矾科、壳斗科植物为主;草本层有 46 种,隶属 28 科 42 属,以百合科(Liliaceae)、荨麻科(Urticaceae)、蓼科(Polygonaceae)植物居多。可见,灌木层物种丰富度最高,草本层次之,乔木层最低。不同强度人为干扰下,群落物种组成不同。轻度干扰样地有 81 种植物,隶属 42 科 63 属,中度干扰样地有 110 种植物,隶属 49 科 76 属,重度干扰样地有 93 种植物,隶属 48 科 74 属。随着干扰程度的增加,物种丰富度呈现先增后减的趋势,中度干扰下群落物种数量最多。

对多样性指数的影响 群落各层次的物种丰富度指数(D)、Shannon-wiener 指数(H)表现为灌木层>草本层>乔木层(表 2),说明灌木层物种多样性水平最高,草本层次之,乔木层最小。Simpson 优势度指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J_{sw})表现为灌木层>乔木层>草本层,表明灌木层、乔木层和草本层的优势成分越来越明显,但物种分布均匀程度呈下降趋势。在中度干扰下乔木层、灌木层、草本层的多样性指数均不存在显著差异($P>0.05$)。乔木层与草本层的 D、H、H'和 J_{sw} 在中度干扰下最高,随着干扰程度的增加,各指数呈先增后减趋势。灌木层的 D 在中度干扰下最高,其余多样性指数均为重度干扰>轻度干扰>中度干扰。

对重要值的影响 从表 3 可见,不同人为干扰强度下乔木层优势种有栲树、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、枹栎(*Quercus serrata*)等,在轻度干扰下其重要值较高。轻、中、重度干扰下乔木层优势种数量分别为 18、22 和 14,总体数量较少,组成较为单一。新木姜子(*Neolitsea aurata*)在轻度和中度

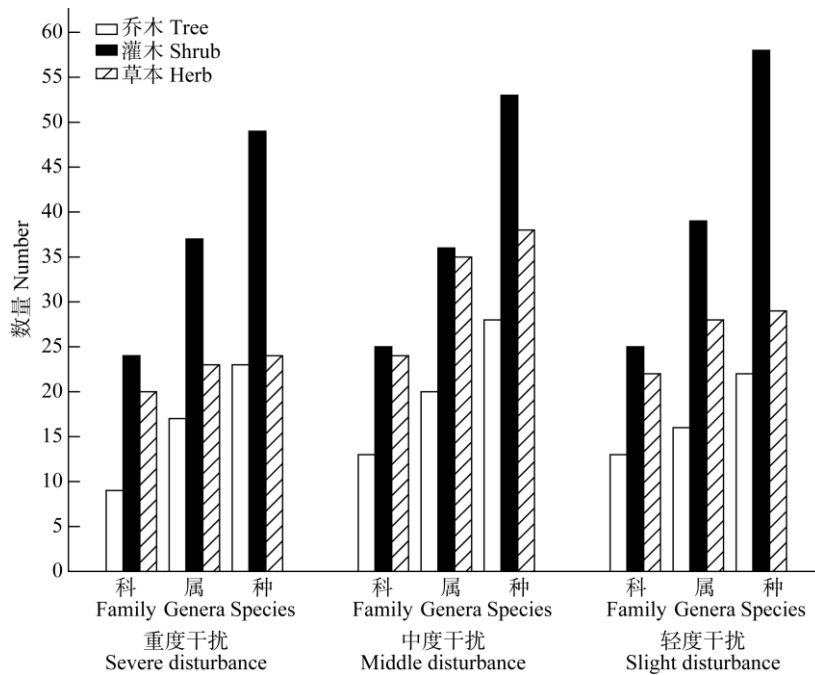


图 1 不同人为干扰强度和群落层次的科、属、种数量

Fig. 1 Number of family, genus, species in different layers of *Castanopsis fargesii* community under different disturbance

表 2 栲树次生林群落的物种多样性

Table 2 Species diversities of the three community levels of the secondary *Castanopsis fargesii* forest

干扰强度 Disturbance intensity	层次 Layer	Shannon-wiener 指数 Shannon-wiener index (H)	Simpson 优势度指数 Simpson dominant index (H')	物种丰富度指数 Specie richness index (D)	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index (J_{sw})
轻度 Slight	乔木 Tree	2.169 4 ± 0.135 9a	0.841 3 ± 0.021 4ab	15.000 0 ± 1.527 5a	0.802 9 ± 0.019 2a
	灌木 Shrub	2.889 8 ± 0.040 6a	0.928 8 ± 0.002 5a	25.000 0 ± 0.577 4b	0.897 8 ± 0.006 2a
	草本 Herb	2.002 1 ± 0.218 9a	0.798 3 ± 0.048 3a	14.666 7 ± 1.855 9b	0.746 0 ± 0.046 7a
中度 Middle	乔木 Tree	2.351 0 ± 0.054 1a	0.861 0 ± 0.004 8a	18.000 0 ± 1.732 1a	0.816 7 ± 0.012 3a
	灌木 Shrub	2.580 4 ± 0.261 8a	0.853 4 ± 0.042 9a	33.666 7 ± 0.666 7a	0.734 1 ± 0.075 8a
	草本 Herb	2.536 3 ± 0.175 3a	0.872 9 ± 0.030 8a	24.333 3 ± 1.201 9a	0.793 9 ± 0.042 9a
重度 Severe	乔木 Tree	2.036 1 ± 0.066 3a	0.800 4 ± 0.010 2b	15.000 0 ± 0.577 4a	0.751 9 ± 0.014 0a
	灌木 Shrub	3.123 4 ± 0.036 4a	0.943 8 ± 0.003 4a	30.666 7 ± 0.881 9a	0.912 7 ± 0.009 7a
	草本 Herb	2.021 3 ± 0.169 9a	0.772 6 ± 0.036 8a	17.666 7 ± 1.201 9b	0.703 7 ± 0.048 1a

干扰中出现,在重度干扰下消失,表明其生存环境遭到破坏,抗干扰能力较弱。不同干扰强度下灌木层物种更新迅速,种类丰富,优势种数量呈先增后减趋势,轻、中、重度干扰下优势树种无重叠,数量分别为 50、57 和 44,在轻度干扰下,栲树、木荷、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)为优势种,且多为其幼树幼苗;随着干扰的加强,林内光照和空间分配改变,群落中林下植物增多,以木姜子(*Litsea pungens*)、刚竹(*Phyllostachys sulphurea*)、黄牛奶(*Symplocos laurina*)等为优势种,其中木姜子、茶(*Camellia sinensis*)抗干扰能力较强。不同人为干扰强度下草本层优势种数量为中度>轻度>重度,轻、

中、重度干扰下草本层优势种数量分别为 24、33 和 19,中度干扰下数量最多,以肉穗草(*Sarcopyramis bodinieri*)、里白(*Hicriopteris glauca*)、水竹叶(*Murdannia triquetra*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)为主,肉穗草和里白对环境的适应性强,抗干扰能力极强。

3.2 对土壤理化性质的影响

不同人为干扰强度下群落土壤理化性质不同(表 4),土壤含水量(SW)、全氮含量(TN)、有效磷含量(AP)、有机质含量(OM)、速效钾含量(AK)、全钾含量(TK)均为中度干扰>轻度干扰>重度干扰,

表 3 栲树次生林群落各层次物种的重要值

Table 3 Importance values of species in different layers of *Castanopsis fargesii* community

层次 Layer	干扰强度 Disturbance intensity	优势种 Dominant species	重要值总和 Total importance value
乔木层 Tree	轻度 Slight	栲 + 杉木 + 枹栎 + 大头茶 + 新木姜子 <i>Castanopsis fargesii</i> + <i>Cunninghamia lanceolata</i> + <i>Quercus serrata</i> + <i>Gordonia axillaris</i> + <i>Neolitsea aurata</i>	0.758 5
	中度 Middle	栲 + 杉木 + 枹栎 + 新木姜子 + 五裂槭 <i>Castanopsis fargesii</i> + <i>Cunninghamia lanceolata</i> + <i>Quercus serrata</i> + <i>Neolitsea aurata</i> + <i>Acer oliverianum</i>	0.647 1
	重度 Severe	栲 + 杉木 + 枹栎 + 大头茶 + 木荷 <i>Castanopsis fargesii</i> + <i>Cunninghamia lanceolata</i> + <i>Quercus serrata</i> + <i>Gordonia axillaris</i> + <i>Schima superba</i>	0.683 5
灌木层 Shrub	轻度 Slight	栲 + 木荷 + 野漆 + 交让木 + 新木姜子 <i>Castanopsis fargesii</i> + <i>Schima superba</i> + <i>Toxicodendron succedaneum</i> + <i>Daphniphyllum macropodum</i> + <i>Neolitsea aurata</i>	0.344 3
	中度 Middle	刚竹 + 木姜子 + 茶 + 虎皮楠 + 菝葜 <i>Phyllostachys sulphurea</i> + <i>Litsea pungens</i> + <i>Camellia sinensis</i> + <i>Daphniphyllum oldhami</i> + <i>Smilax china</i>	0.338 3
	重度 Severe	木姜子 + 黄牛奶 + 五裂槭 + 茶 + 紫金牛 <i>Litsea pungens</i> + <i>Symplocos laurina</i> + <i>Acer oliverianum</i> + <i>Camellia sinensis</i> + <i>Ardisia japonica</i>	0.383 0
草本层 Herb	轻度 Slight	水竹叶 + 肉穗草 + 里白 + 黑足鳞毛蕨 + 乌蕨 <i>Murdannia triquetra</i> + <i>Sarcopyramis bodinieri</i> + <i>Hicriopteris glauca</i> + <i>Dryopteris fuscipes</i> + <i>Stenoloma chusanum</i>	0.568 9
	中度 Middle	蕨 + 里白 + 糯米团 + 山冷水花 + 肉穗草 <i>Pteridium aquilinum</i> + <i>Hicriopteris glauca</i> + <i>Gonostegia hirta</i> + <i>Pilea japonica</i> + <i>Sarcopyramis bodinieri</i>	0.465 3
	重度 Severe	水竹叶 + 肉穗草 + 里白 + 蕨 + 玉簪 <i>Murdannia triquetra</i> + <i>Sarcopyramis bodinieri</i> + <i>Hicriopteris glauca</i> + <i>Pteridium aquilinum</i> + <i>Hosta plantaginea</i>	0.689 2

表 4 不同干扰程度下栲树群落土壤的理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties of *Castanopsis fargesii* community under different disturbance

干扰强度 Disturbance intensity	pH	全氮 Total nitrogen (TN) (g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (TP) (g kg ⁻¹)	速效磷 Available Phosphorus (AP) (mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (OM) (g kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (AK) (mg kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (TK) (g kg ⁻¹)	含水量 /% Water content (SW)
轻度 Slight	4.15 ±0.03a	11.18 ±0.05a	0.12 ±0.00a	80.39 ±8.49b	54.03 ±1.41b	0.06 ±0.00a	14.97 ±0.41a	0.27 ±0.01a
中度 Middle	4.04 ±0.03b	11.80 ±0.76a	0.10 ±0.01a	157.41 ±8.15a	66.03 ±3.87a	0.08 ±0.02a	19.37 ±4.74a	0.28 ±0.04a
重度 Severe	3.88 ±0.02c	8.05 ±0.33b	0.10 ±0.01a	73.48 ±11.60b	43.56 ±0.96b	0.05 ±0.00a	11.83 ±0.14a	0.27 ±0.02a

表 5 物种多样性与土壤理化性质的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of *Castanopsis fargesii* community

	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	H	H'	D	J _{sw}	H	H'	D	J _{sw}	H	H'	D	J _{sw}
pH	0.30	0.53	0.05	0.55	-0.33	-0.16	-0.54	-0.09	0.03	0.20	-0.18	0.26
TN	0.72**	0.79**	0.53	0.76**	-0.48	-0.44	0.01	-0.40	0.53	0.60*	0.35	0.64*
TP	0.27	0.45	-0.05	0.55*	0.19	0.36	-0.66*	0.39	-0.08	0.04	-0.35	0.20
AP	-0.32	-0.51	-0.16	-0.45	0.67*	0.58*	0.08	0.54	-0.15	-0.26	-0.20	-0.10
OM	0.68*	0.77**	0.41	0.81**	-0.64*	-0.59*	0.32	-0.65*	0.57*	0.56*	0.57*	0.49
AK	0.45	0.31	0.56*	0.19	0.12	-0.05	0.61*	-0.10	0.69**	0.56*	0.74**	0.51
TK	0.46	0.30	0.56*	0.20	0.13	-0.04	0.63*	-0.09	0.70**	0.57*	0.73**	0.54
SW	0.21	0.10	0.41	-0.04	-0.51	-0.62*	0.30	-0.52	0.24	0.27	0.23	0.21

H, H', D, J_{sw} 见表 2; pH, TN, TP, AP, OM, AK, TK, SW 见表 4。

H, H', D, J_{sw} see Table 2; pH, TN, TP, AP, OM, AK, TK, SW see Table 4.

土壤 pH、全磷含量(TP)为轻度干扰 > 中度干扰 > 重度干扰, 其中, 土壤 pH、TN、AP、OM 在不同干扰强度间差异显著($P < 0.05$)。

3.3 相关性分析

物种多样性指数和土壤理化性质的相关性分析表明(表 5), 乔木层的 D 和 TK、AK 呈显著正相

关, H、H'、J_{sw} 与 TN、OM 呈极显著正相关的关系。灌木层的 H 和 H' 与 AP 表现出显著正相关, 与 OM 表现显著负相关, D 与 TK、AK 呈显著正相关, J_{sw} 与 OM 呈显著负相关。草本层的物种 H、H'、D 与 OM、AK、TK 均表现出显著或极显著正相关, 与 TP、AP 呈负相关, H' 和 J_{sw} 与 TN 呈显著正相关。

4 结论和讨论

物种多样性反映了群落的结构组成、演替过程、生境差异^[18]。本次调查表明, 栲树次生林群落乔木层和草本层各多样性指数均在中度干扰下最高, 表明中度干扰相对有利于乔木层和草本层植物群落的多样性和稳定性, 符合“中度干扰假说”。在不同强度人为干扰下, 灌木层物种多样性水平最高, 种类最丰富, 这与李艳等^[19]的研究结果一致。灌木层物种丰富度指数(D)在中度干扰下最高, 其余指数均在重度干扰下最高, 表明在中度干扰下灌木层物种数量虽最多, 但均匀度指数却最低, 这与郝建锋等^[20]认为中度干扰促进物种多样性的研究结果不同, 可能是在轻度干扰下, 乔木层优势种明显, 竞争力强, 在一定程度上抑制林下植物生长; 在中度干扰下, 林下植物可吸收的光照和养分增多, 可利用空间增大, 故物种数量大幅上升, 但草本植物生长迅速, 生长周期较短暂, 更具优势, 灌木层在此干扰下的空间竞争力和营养争夺力弱于草本层, 故分布集中且极不均匀。在重度干扰下, 人为砍伐、踩踏、旅游等现象使乔木层和草本层植物生境遭受严重破坏, 而灌木层植被遭受的破坏和影响较小, 因此灌木层物种数虽略微下降, 但其他多样性指数均上升。此外还可能与人为干扰的途径和范围、群落不同层次物种的耐受限度、种群的繁殖方式等相关^[21]。

对重要值的研究表明, 乔木层优势种为栲树, 轻度干扰下重要值为 0.316 4。在重度干扰下栲树依然为优势种, 重要值为 0.273 4, 表明栲树的生存能力及抗干扰能力较强, 但由于人为砍伐和日益增加的旅游活动等的持续干扰作用, 其自然更新能力急剧降低, 栲在之后干扰较强的灌木层群落中消失。

土壤是影响植物群落环境的重要因素, 与群落结构和多样性紧密关联, 且一直是生态学的研究重点^[22]。本研究结果表明, 在中度干扰下土壤各指标大部分达到最大值, 说明适当强度的人为干扰能够增加土壤肥力, 促进水土保持作用。不同强度干扰下土壤酸碱度整体呈酸性, 与碧峰峡土壤为黄壤的特点相符, 随着干扰强度的增加, 土壤 pH 下降, 可能是因为人为干扰破坏导致水土流失严重, 风化淋溶作用加强, 盐基淋失, 因而土壤酸性增加。乔木层与草本层物种多样性指数与 TN、OM、TK、AK 显著或极显著正相关, 灌木层多样性指数与 OM 呈

显著负相关, 与 AP、TK、AK 呈显著正相关, 因此土壤钾、有机质、氮、磷是影响栲树群落物种多样性的重要因子。碧峰峡酸性黄壤持钾能力弱, 淋失作用使土壤钾肥不足^[23], 而钾为植物完成生活史所需的必需元素, 其含量的增加有利于植物生长发育^[24], 因此乔灌木物种多样性均与钾显著正相关。森林凋落物和地表枯枝落叶的积累使有机质含量增高^[25], 同时有机质的矿化提高氮的含量, 两者均能促进乔木层和草本层物种多样性, 但与灌木层负相关, 原因可能是土壤腐殖层使土壤养分增加, 促使灌木层和草本层优势植物快速增长, 草本层优势植物竞争作用更强, 对灌木层物种排斥增强, 因而灌木层群落物种多样性水平降低^[26]。同时土壤磷对灌木层植物多样性影响较明显。人为干扰下乔灌木植物生物量的改变和降水的分配等会影响林下小生境的形成和土壤表层养分性质的改变, 因而土壤因子与物种多样性的关系也较为复杂^[27], 如要深入讨论两者关系, 还需测定土壤其他因子, 进行更深入的研究。

本研究为碧峰峡地区植物群落保护和合理开发利用提供一定的理论依据和参考。为进一步保护碧峰峡次生林的物种多样性, 还应采用近自然林业的方法, 通过补植生态和经济价值较高的乡土树种, 如桢楠(*Phoebe zhennan*)、红豆杉(*Taxus walli-chiana* var. *chinensis*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、润楠(*Machilus pingii*)、木荷等^[28], 加强土壤改良、间伐等营林措施, 加速其自然演替的进程, 并实现森林多功能经营。

参考文献

- [1] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, LÓPEZ-MATA L. Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico [J]. *Divers Distrib*, 2005, 11(6): 567–575. doi: 10.1111/j.1366-9516.2005.00186.x.
- [2] CHEN F R, CHENG J M, LIU W, et al. Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of Loess Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(9): 2856–2866. doi: 10.5846/stxb201201140085.
陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2856–2866. doi: 10.5846/stxb201201140085.
- [3] MENG Y Y, ZHOU L, ZHOU W M, et al. Characteristics of plant species diversity in a windthrow area on Changbai Mountain after 26

- years of natural recovery [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(1): 142–149. doi: 10.5846/stxb201405301109.
- 孟莹莹, 周莉, 周旺明, 等. 长白山风倒区植被恢复 26 年后物种多样性变化特征 [J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 142–149. doi: 10.5846/stxb201405301109.
- [4] GHALEY B B, PORTER J R. Ecosystem function and service quantification and valuation in a conventional winter wheat production system with DAISY model in Denmark [J]. *Ecosyst Serv*, 2014, 10: 79–83. doi: 10.1016/j.ecoser.2014.09.010.
- [5] SHANNON C E, WEAVER W. *The Mathematical Theory of Communication* [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 23–26.
- [6] SUN R Y. *General Ecology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 332–340.
- 孙儒泳. *普通生态学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 332–340.
- [7] HAUTIER Y, TILMAN D, ISBELL F, et al. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability *via* biodiversity [J]. *Science*, 2015, 348(6232): 336–340. doi: 10.1126/science.aaa1788.
- [8] WILLIAMS A, HEDLUND K. Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden [J]. *Appl Soil Ecol*, 2013, 65: 1–7. doi: 10.1016/j.apsoil.2012.12.019.
- [9] GAYLOR M O, MEARS G L, HARVEY E, et al. Polybrominated diphenyl ether accumulation in an agricultural soil ecosystem receiving wastewater sludge amendments [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(12): 7034–7043. doi: 10.1021/es5014032.
- [10] HOLMES P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: Effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition [J]. *Restor Ecol*, 2001, 9(1): 71–84. doi: 10.1046/j.1526-100x.2001.009001071.x.
- [11] DU J Q, ZHANG Q X, TIAN X D, et al. Relationships between vegetation distribution, species diversity of subalpine meadow and soil chemical factors in the Yundingshan, China [J]. *Bull Bot Res*, 2016, 36(3): 444–451. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2016.03.019.
- 杜京旗, 张巧仙, 田晓东, 等. 云顶山亚高山草甸植被分布、物种多样性与土壤化学因子的相关性 [J]. *植物研究*, 2016, 36(3): 444–451. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2016.03.019.
- [12] FAN Y, LI Z Y, FAN C F, et al. Species diversity along the succession series from bamboo forest to broad-leaved forest in a limestone mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(12): 3238–3244. doi: 10.13292/j.1000-4890.2014.0285.
- 樊燕, 黎祖尧, 范承芳, 等. 石灰岩山地淡竹林演替序列的群落物种多样性 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3238–3244. doi: 10.13292/j.1000-4890.2014.0285.
- [13] MO J M, PENG S L, BROWN S, et al. Nutrient dynamics in response to harvesting practices in a pine forest of subtropical China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, 28(6): 810–822. doi: 10.17521/cjpe.2004.0106.
- 莫江明, 彭少麟, BROWN S, 等. 鼎湖山马尾松林植物养分积累动态及其对人为干扰的响应 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 810–822. doi: 10.17521/cjpe.2004.0106.
- [14] GU J C, WANG Z Q, HAN Y Z, et al. Effects of harvesting on spatial heterogeneity of soil moisture in secondary forests of Maoershan region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(8): 2001–2009. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.08.025.
- 谷加存, 王政权, 韩有志, 等. 采伐干扰对帽儿山天然次生林土壤表层水分空间异质性的影响 [J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 2001–2009. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.08.025.
- [15] TANG C X, XU E X, TANG Y, et al. Adaptability of giant panda to a new habitat in Bifengxia, Ya'an, Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, 13(5): 686–690. doi: 10.3321/j.issn:1006-687x.2007.05.017.
- 汤纯香, 许尔兴, 汤洋, 等. 大熊猫迁居碧峰峡新生境的适应能力研究 [J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(5): 686–690. doi: 10.3321/j.issn:1006-687x.2007.05.017.
- [16] LU Q B, YOU W Y, ZHAO C J, et al. Effects of tourism disturbance on plant diversity in Qingshan Lake scenic area of Zhejiang Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(2): 295–302. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0051.
- 鲁庆彬, 游卫云, 赵昌杰, 等. 旅游干扰对青山湖风景区植物多样性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 295–302. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0051.
- [17] FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiv Sci*, 2009, 17(6): 533–548. doi: 10.3724/SP.J.1003.2009.09253.
- 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533–548. doi: 10.3724/SP.J.1003.2009.09253.
- [18] WANG M, DONG Z B, LUO W Y, et al. Species diversity of vegetation and its relationship with soil characteristics in the southern marginal zone of the Badain Jaran Desert [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2015, 35(2): 379–388. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2015.02.0379.
- 王蒙, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系 [J]. *西北植物学报*, 2015, 35(2): 379–388. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2015.02.0379.
- [19] WANG Y J, TAO J P, ZHANG W Y, et al. Dynamics of species diversity in vegetation restoration on Tudiling of Mao County, southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(4): 1028–1036. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.04.008.

- 王永健, 陶建平, 张炜银, 等. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征 [J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1028–1036. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.04.008.
- [20] HAO J F, LI Y, QI J Q, et al. Effects of anthropogenic disturbances on the species diversity and niche of the dominant populations in a *Castanopsis fargesii* secondary forest community in Bifengxia, Sichuan [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(23): 7678–7688. doi: 10.5846/stxb201511212361.
- 郝建锋, 李艳, 齐锦秋, 等. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7678–7688. doi: 10.5846/stxb201511212361.
- [21] WU G L, HUANG M Y, DUAN R Y, et al. Disturbing effects of tourism on species diversity in *Pinus taiwanensis* communities [J]. Acta Ecol Sin, 2006, 26(12): 3924–3930. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.002.
- 吴甘霖, 黄敏毅, 段仁燕, 等. 不同强度旅游干扰对黄山松群落物种多样性的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(12): 3924–3930. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.002.
- [22] YANG W Q, ZHONG Z C, TAO J P. The distribution of soil available phosphorus and its correlations with plant species diversity in the forest of Mt. Jinyun [J]. Chin J Ecol, 2001, 20(4): 24–27. doi: 10.13292/j.1000-4890.2001.0069.
- 杨万勤, 钟章成, 陶建平. 缙云山森林土壤速效 P 的分布特征及其与物种多样性的关系研究 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(4): 24–27. doi: 10.13292/j.1000-4890.2001.0069.
- [23] DONG Y H, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils [J]. Soils, 2014, 46(2): 225–231. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2014.02.005.
- 董艳红, 王火焰, 周健民, 等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究 [J]. 土壤, 2014, 46(2): 225–231. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2014.02.005.
- [24] HE B, XUE G, ZHANG X Q, et al. Analysis on chemical mechanism of potassium release process from soil as influenced by organic acids [J]. Soils, 2015, 47(1): 74–79. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2015.01.012.
- 何冰, 薛刚, 张小全, 等. 有机酸对土壤钾素活化过程的化学分析 [J]. 土壤, 2015, 47(1): 74–79. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2015.01.012.
- [25] YANG B X, LIU Q, WANG B. Relationships between soil nutrients, soil enzyme activity and plant diversity of different types of in Jialing River Basin, Sichuan [J]. Res Soil Water Conserv, 2016, 23(6): 45–51,58. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.004.
- 杨秉珣, 刘泉, 王彬. 嘉陵江流域不同类型植被多样性与土壤养分和酶活性的关系 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 45–51,58. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.004.
- [26] AN C P, WANG X, SONG N P, et al. Effect of soil nutrient on community composition and diversity of *Caragana intermedia* in desert steppe [J]. Acta Bot Boreal-Occid Sin, 2016, 36(9): 1872–1881. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.09.1872.
- 安超平, 王兴, 宋乃平, 等. 荒漠草原中间锦鸡儿林土壤养分效应对群落组分和多样性的影响 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(9): 1872–1881. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.09.1872.
- [27] ZENG X H, ZHANG W J, SONG Y G, et al. Species diversity and soil nutrient dynamics along a chronosequence of vegetation restoration in Taihang Mountains hilly region, Hebei Province of north China [J]. Chin J Ecol, 2013, 32(4): 852–858. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0188.
- 曾歆花, 张万军, 宋以刚, 等. 河北太行山低山丘陵区植被恢复过程中物种多样性与土壤养分变化 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 852–858. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0188.
- [28] HAO J F, ZHANG Y B, LI Y, et al. Effects of human disturbance on species diversity and community structure of *Symplocos sumuntia* secondary forest in Bifengxia in western Sichuan [J]. J Trop Subtrop Bot, 2016, 24(5): 559–567. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.012.
- 郝建锋, 张逸博, 李艳, 等. 人为干扰对川西碧峰峡山矾次生林群落结构和物种多样性的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(5): 559–567. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.012.