北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状

冯浩育 陈思帆 索奥丽 龚俊伟 陈锋 刘晓东

Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China

Feng Haoyu, Chen Sifan, Suo Aoli, Gong Junwei, Chen Feng, Liu Xiaodong

引用本文:
冯浩育, 陈思帆, 索奥丽, 龚俊伟, 陈锋, 刘晓东. 不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):38–47. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230324
Feng Haoyu, Chen Sifan, Suo Aoli, Gong Junwei, Chen Feng, Liu Xiaodong. Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):38–47. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230324

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230324

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京百花山落叶阔叶林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征

Variation characteristics in leaf functional traits of woody plants in deciduous broadleaved forest community in Baihua Mountain of Beijing

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 40–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220462

锡林郭勒草原灌丛化对灌丛间地草本群落物种多样性和生物量的影响

Effects of shrub encroachment in Xilin Gol Steppe on the species diversity and biomass of herbaceous communities in shrub interspaces area

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 57–67. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180411

妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析

Correlations between stand structure and surface potential fire behavior of *Pinus tabuliformis* forests in Miaofeng Mountain of Beijing

北京林业大学学报, 2019, 41(1): 73–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180304

北京松山油松叶功能性状沿海拔梯度的变化及其环境解释

Variations in leaf functional traits along the altitude gradient of *Pinus tabuliformis* and its environmental explanations in Beijing Songshan Mountain

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 47–55. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200292

胡杨叶功能性状的协同与权衡及对树龄、土壤因子的响应

Coordination and trade–off of leaf functional traits in *Populus euphratica* and their response to tree age and soil factors

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220522

干旱胁迫环境中黄栌幼苗叶功能性状变异与产地地理气候因子的关系

Relationship between leaf functional trait variation of *Cotinus coggygria* seedling and location geographical–climatic factors under drought stress

北京林业大学学报, 2020, 42(2): 68−78. https://doi.org/10.12171/j.1000−1522.20190079

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230324

不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状

冯浩育　陈思帆　索奥丽　龚俊伟　陈　锋　刘晓东
（北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】林火是森林生态系统重要的干扰因子，灌木作为森林群落重要的组成部分，研究火后灌木物种多样性以及叶功能性状的变化，可为火后林下灌木层植被的恢复提供科学依据。**【方法】**以山西太岳山油松林灌木优势种为研究对象，对不同火烈度（对照、轻、中、重度火烧）样地进行物种多样性调查及样品采集。计算 4 种多样性指数（Shannon 指数、Simpson 指数、Pielou 指数、Margalef 指数），测定优势灌木叶片的 8 个叶功能性状指标（叶磷含量、氮磷比、叶钾含量、叶氮含量、叶有机碳含量、叶干物质含量、叶厚度、比叶面积）。运用方差分析、多元回归分析研究物种多样性与叶功能性状在不同火烈度之间的差异显著性、变化及变异情况，采用相关性分析探究物种多样性间、叶功能性状间及其两者间的关系。**【结果】**（1）Pielou 指数在重度火烧时具有最大值 0.90，其大小按顺序为重度 > 中度 > 对照 > 轻度，而 Shannon 指数、Simpson 指数、Margalef 指数均在中度火烧时出现最大值 1.65、0.74、1.43，且均有中度 > 重度 > 对照 > 轻度的规律。不同火烈度间的物种多样性指数具有不同的差异显著性（$P < 0.05$）。（2）叶有机碳含量（5.00%）变异系数最小，比叶面积（20.30%）变异系数最大。（3）除叶钾含量之外，其余叶功能性状在不同火烈度间均差异显著。随着火烈度的增加，叶干物质含量、叶磷含量、叶厚度逐渐增大，而叶有机碳含量先减小后增大。（4）叶功能性状之间、物种多样性指数之间、叶功能性状与物种多样性指数间均具有较强的相关性。**【结论】**火烈度对灌木层物种多样性、叶功能性状均具有显著影响，叶功能性状与物种多样性间存在较强的耦合关系。

关键词：火烈度；灌木；物种多样性；叶功能性状；相关性分析
中图分类号：S762　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)06−0038−10
引文格式：冯浩育，陈思帆，索奥丽，等. 不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状［J］. 北京林业大学学报，2024，46(6)：38−47. Feng Haoyu, Chen Sifan, Suo Aoli, et al. Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 38−47.

Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China

Feng Haoyu　Chen Sifan　Suo Aoli　Gong Junwei　Chen Feng　Liu Xiaodong
(Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］Forest fire is the important disturbance factor of forest ecosystem. Shrub is an important part of the forest community. Studying the change of species diversity and leaf functional traits can provide scientific basis for the recovery of shrub layer plants after fire.［**Method**］Taking the understory shrub layer plants of *Pinus tabuliformis* forest in the fire-burned land of Taiyue Mountain in Shanxi Province as the research object, for different fire severities (control, mild, moderate, and severe fire), species diversity investigations and sample collection were performed, and 4 diversity indexes (Shannon index, Simpson

收稿日期: 2023−11−14　**修回日期:** 2024−03−14
基金项目: 国家自然科学基金项目（32271890）。
第一作者: 冯浩育。主要研究方向：森林防火。Email：623521523@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号。
责任作者: 刘晓东，博士，教授。主要研究方向：森林防火。Email：xd_liu@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

index, Pielou index, Margalef index) were calculated. Eight functional trait indicators (leaf phosphorus content, nitrogen-phosphorus ratio, leaf potasslum content, leaf nitrogen content, leaf organic carbon content, leaf dry matter content, leaf thickness, specific leaf area) of dominant shrub leaves were measured. Using one-way ANOVA and multiple regression analysis, we analyzed the diversity index and leaf functional trait values and studied the significance, variation patterns, and variation characteristics of differences between varied fire severities, and analyzed the correlations between species diversity and leaf functional traits. [**Result**] (1) The Pielou index had a maximum value of 0.90 in severe burning, and its magnitude was severe > moderate > control > mild, while Shannon index, Simpson index and Margalef index all had maximum values of 1.65, 0.74 and 1.43 during moderate burning, with moderate > severe > control > light. Four diversity indexes between different fire severities had varied significant differences ($P < 0.05$). (2) The coefficient of variation of leaf organic carbon content (5.00%) was the smallest, and the coefficient of variation of specific leaf area (20.30%) was the largest. (3) Except for leaf potassium content, the other leaf functional traits were significantly different among varied fire severities. As the fire severities increased, the overall trend of changes in leaf thickness, leaf phosphorus content, and leaf dry matter content was gradually increasing. The overall trend of organic carbon content in leaves decreased first and then increased. (4) There were strong correlations among species diversity, leaf functional traits, species diversity with leaf functional traits. [**Conclusion**] Fire severity has a significant impact on plant species diversity and leaf functional traits in the shrub layer, and has a complex interrelationship between leaf functional traits and species diversity.

Key words: fire severity; shrub; species diversity; leaf functional trait; correlation analysis

林火作为森林生态系统中独特的、重要的自然因子，具有两种属性，即生态性与破坏性[1]。生态性表现在适度的林火能够促进森林生态系统的物质循环和物种更新[2]，而破坏性表现在烧毁植被，对森林生态系统所具有的独特稳定结构和生态功能造成破坏，影响森林生态系统的整体性和稳定性[3]。林火烈度是指森林火灾对森林生物群落与无机环境的破坏程度，森林生态系统的各项生态过程都受其直接影响[4]。灌木是林下活可燃物负荷量的主要成分[5]，也是森林群落的重要组成部分，具有种类多、分布广、适应性强等特点[6]，并在森林生态系统进行群落演替与物种更新的过程中，起到涵养水源、促进养分循环[7]、保护生物多样性等作用[8]。火烧对高大乔木的冠层造成不同程度的破坏，增加了灌木植物的光照强度，促进了灌木植物的生长，使得灌木植物能够对过火后的环境做出响应。因此，研究不同火烈度对林下灌木的影响具有十分重要的意义。

物种多样性可用于衡量火烧迹地群落的恢复[9]，能够反映物种的数量、组成结构以及分布状况[10]，体现火后森林群落类型、生境条件及其稳定性差异[11]。近年来有学者[12]研究过火后群落物种多样性的变化趋势与规律，并运用数学模型研究群落的稳定性[13]。栗马玲等[9]研究了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)群落过火后 12 年的物种多样性，发现森林群落在经过轻、中度火烧后出现较高的物种多样性，且物种多样性指数在中度火烧样地出现最大值。有学者[12]发现随着火烈度的逐渐增加，植被的物种多样性降低。赵蔓等[13]通过对过火后 10 个月的油松(*Pinus tabuliformis*)针叶次生林的研究，发现中度火烧样地的群落稳定性最高，重度火烧样地的多样性指数与对照样地相比具有显著的提升。陈小雪等[14]分析麻栎(*Quercus acutissima*)与黑松(*Pinus thunbergii*)的混交林火烧后灌木层物种多样性变化，认为火烧促进了灌木层植物的更新，增加了灌木层的物种多样性。因此，可以通过研究过火后群落物种多样性的变化，为过火后森林群落的恢复提供理论依据。

植物功能性状是指植物个体的形态、生理、生化等特征，它能够响应生物与非生物环境的变化，也能影响生态系统进程[15]。植物的功能性状与外界环境能够相互适应并且共同进化[16]。当环境和资源受到干扰时，植物个体会通过改变其外部形态结构、内部生理结构和生理活动，达到适应外部环境的目的，从而维持种群或群落的稳定，因此植物功能性状对生存环境的响应是植物适应环境的生存策略[17]。

叶片是叶最重要的组成部分，是蒸腾作用和光合作用的场所，影响植物有机物质的合成，对植物的生长和发育起着重要作用。同时叶片对于环境的变化较为敏感，能够形成适应环境变化的植物生长对策[18]。有研究表明，白桦(*Betula platyphylla*)叶的碳、氮含量以及碳氮比随着火烧强度的增加而升高，而白桦叶的氮含量、碳磷比和氮磷比随着火烧强度的增加而减少[19]。也有学者[12]发现，火烧会增大植

物的比叶面积。顾泽等[20]以油松为研究对象，发现叶功能性状在不同火烈度间差异显著，且叶面积的变异系数最大具有较强的可塑性。Kaewsong 等[21]发现在经历不同烈度火烧后，功能性状的分布会发生明显变化，与轻度火烧相比，重度火烧使得植物具有较低的叶干物质含量以及较高的叶氮含量和叶磷含量。Song 等[22]以大兴安岭地区兴安落叶松群落为研究对象，证明了具有较强氮和磷内稳性的物种，对于过火后群落物种多样性恢复至关重要。Wang 等[23]认为，火烧可能通过改变凋落叶的养分状况和化学计量比来改变凋落物的质量，从而间接影响生态系统的凋落物分解和养分循环。

综上所述，目前关于林火对植被影响的研究多集中在油松[13,20]、兴安落叶松[9,22]等乔木层群落，而结合物种多样性与叶功能性状探讨灌木层植被在火烧迹地内变化的研究较少[12]。本研究以山西太岳山火烧迹地内油松林灌木植物为研究对象，探究不同火烈度对灌木层植物物种多样性、叶功能性状的影响，分析火烧迹地内物种多样性与叶功能性状的内在联系。旨在为火烧迹地内物种多样性的维持以及火后植被恢复提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域处于我国山西省沁源县太岳山北麓（36°69′ ~ 36°84′ N，112°28′ ~ 112°37′ E），平均海拔 1 296 m，该研究地区为暖温带半湿润大陆性季风气候，土壤以淡褐土为主，降雨时间主要集中在每年 7—9 月，年降水量 400 ~ 500 mm，年平均气温 8.9 ℃，平均无霜冻期为 90 ~ 170 d。乔木以辽东栎（*Quercus wutaishanica*）和油松为主，灌木以绣线菊（*Spiraea salicifolia*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、山杨（*Populus davidiana*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）为主，草本以小红菊（*Chrysanthemum chanetii*）、细叶薹草（*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*）、地榆（*Sanguisorba officinalis*）为主[24]。在 2019 年 3 月 29 日，山西省沁源县王陶乡王陶村发生了过火面积达 667 hm^2 的森林火灾[20]，油松林过火后只存在枯立木，其余植物的地上部分及林下的腐殖质全部被烧毁[24]。

1.2 样地设置

火烈度常用火烧后林木死亡率来表示[4]。在 2023 年 6 月中旬对太岳山火烧迹地进行全面踏查，并在 6 月底至 7 月初开展野外调查，以火烈度差异以及是否发生森林火灾为依据，在火烧迹地内设置轻度、中度、重度火烧样地，在未过火、立地条件相同的区域设置对照样地，不同火烈度各设置 3 块样地，总共设置 12 块样地，每个样地的大小均为 20 m × 20 m。火烈度以树木平均熏黑高度与树高的比值、树木死亡比例（烧死木数量与树木总量之比）来确定，其划分标准如下：树木平均熏黑高度与树高的比值小于 1/3，树木死亡率小于 30% 为轻度火烧；树木平均熏黑高度与树高的比值在 1/3 至 2/3 之间，树木死亡率为 30% 至 70% 为中度火烧；树木平均熏黑高度与树高的比值大于 2/3，树木死亡率大于 70% 为重度火烧[25]。记录样地的基本信息包括郁闭度、经纬度、海拔、坡度、坡位、坡向，调查样地内树木熏黑高度、整株高度以及树木的死亡数量，计算树木的死亡率（表 1）。

1.3 野外调查与样品采集

在每个标准样地的中央和四角距边缘 1 m 处各设置 1 个灌木样方，大小为 2 m × 2 m，总计 60 个灌

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

火烈度 Fire severity	样地 Sample plot	经度 Latitude	纬度 Longitude	平均树高 Mean tree height/m	平均熏黑高度 Mean scorch height/m	树木死亡率 Tree mortality/%	郁闭度 Crown density	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position
轻度 Mild	1	36°42′42″N	112°20′57″E	7.64	0.76	0.00	0.55	1 241	25	上 Up
	2	36°42′43″N	112°20′55″E	8.74	1.43	8.70	0.60	1 239	32	中 Middle
	3	36°42′39″N	112°20′59″E	6.62	0.90	0.00	0.55	1 258	30	中 Middle
中度 Moderate	1	36°49′49″N	112°16′53″E	9.13	3.11	30.95	0.30	1 349	25	中 Middle
	2	36°49′49″N	112°16′54″E	8.82	3.74	30.00	0.30	1 380	32	上 Up
	3	36°49′48″N	112°16′53″E	8.15	2.84	31.48	0.35	1 384	30	上 Up
重度 Severe	1	36°42′37″N	112°20′50″E	5.22	5.22	81.48	0.10	1 324	36	上 Up
	2	36°42′37″N	112°20′52″E	5.10	5.10	100.00	0.10	1 322	36	中 Middle
	3	36°42′38″N	112°20′50″E	4.93	4.90	88.00	0.15	1 314	35	中 Middle
对照 Control	1	36°41′30″N	112°21′59″E	7.93	0.00	0.00	0.70	1 240	30	上 Up
	2	36°41′29″N	112°21′58″E	9.10	0.00	0.00	0.65	1 250	30	上 Up
	3	36°41′29″N	112°22′00″E	9.35	0.00	0.00	0.63	1 250	37	上 Up

注：坡向均为东北向。Note: slope direction is all northeast.

木样方[26]。调查每个样方内所有灌木（包括未达起测直径 5.0 cm 的幼树）的数量、种类、频度及盖度[26]。以 5 个灌木样方内所有灌木的数据代替样地的灌木数据，通过灌木的重要值计算公式，计算样地内灌木植物的重要值，并将重要值大于 0.1 的灌木植物定为样地内的优势灌木植物[9]。针对优势灌木植物需要进行叶片的采集，选取 5 ~ 10 株发育成熟、长势良好的植株，采集东南西北 4 个方向、完全展开、无病虫害干扰的叶片，先将采集到的叶片放在两片清水浸泡过的滤纸之间进行保护，再放入塑封袋，做好样地信息的标注及分类，最后放入恒温箱进行低温保存，延长保存时间，便于后期进行观察和研究。对照样地优势种为虎榛子、绣线菊、胡枝子；轻度火烧样地优势种为虎榛子、绣线菊；中度火烧样地优势种为辽东栎、虎榛子、绣线菊、胡枝子；重度火烧样地优势种为虎榛子、绣线菊、山杨。

1.4　植物叶功能性状的测定

依据功能性状测量手册[27]，选取包括叶干物质含量、叶厚度、比叶面积、叶钾含量、叶氮含量、叶磷含量、氮磷比、叶有机碳含量等叶片功能性状指标进行研究。

将叶片放于水中进行低温（5 ℃）遮光处理 12 h 后，使用滤纸吸干叶片表面的水分，并使用千分之一天平测量饱和鲜质量。使用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测量叶片厚度，将测量完厚度的叶片放于 Epson Perfection V39 扫描仪中进行扫描，并使用 Image J 1.54f 软件对扫描完成的叶子图片进行计算得到叶面积。将扫描后的叶片放于烘箱内，烘干 48 h 至质量恒定不变，天平测量其叶干质量。叶片干质量与叶片饱和鲜质量之比为叶干物质含量；而叶面积与叶干质量之比为比叶面积。将测完叶干质量的叶片，放入行星式球磨仪研磨成粉并过筛。叶有机碳含量用重铬酸钾外加热法进行测定[9]，叶钾含量用火焰原子吸收光谱法测定[28]，叶氮含量用凯式定氮法进行测定，叶磷含量用钼锑抗比色法进行测定[18−19]，而叶氮含量与叶磷含量的比值得到氮磷比[27]。

1.5　重要值与物种多样性指数计算

不同火烈度样地内灌木层各物种重要值的大小在一定程度上能够反映过火后灌木群落中各种灌木植物的重要性及适应能力，计算公式[25]为灌木重要值 =（相对密度 + 相对盖度 + 相对频度）/3。

不同的物种多样性指数中，Shannon 指数侧重于物种丰富度，反映植物群落在物种水平上的多样性与异质性；Simpson 指数侧重于反映群落物种的优势度；Pielou 指数反映群落中物种个体数目分配的均匀度；Margalef 指数能够反映群落内植物种数，体现群落物种丰富度[14]。计算不同火烈度样地内灌木层的物种多样性指数公式[13,26]如下：

Shannon-Wiener 指数（H'）：

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i$$

Simpson 指数（D）：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2$$

Pielou 指数（E）：

$$E = H' / \ln S$$

Margalef 指数（D_{mg}）：

$$D_{mg} = （S-1）/\ln N$$

式中：N 为物种总个体数；S 为物种数目；P_i 为物种 i 个体占全部个体的比例。

1.6　数据处理

本文每个样地群落水平的叶片功能性状值是试验所测定的每个样地优势灌木植物的叶片功能性状数据与对应样地内物种相对多度的加权和[29]。对数据进行初步的整理并计算叶功能性状的变异系数；使用 R4.3.0 中的“vegan”包计算 4 种多样性指数；使用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行以下分析：通过单因素方差分析与最小显著性差异法比较不同火烈度间物种多样性指数、叶功能性状的差异显著性，通过 Pearson 法结合多元逐步回归分析，探究物种多样性间、叶功能性状间以及物种多样性与叶功能性状间的关系；绘图采用 Origin 2021 软件。图表内的数据全部采用平均值 ± 标准误。

2　结果与分析

2.1　不同火烈度间灌木层物种多样性

基于多样性指数的计算公式及不同火烈度样地的群落调查得到的物种多度、种类等数据，进行整理和计算，得到各样地 4 种多样性指数，将多样性指数作为因变量进行单因素方差分析，结果见表 2。

由表 2 可知，灌木层的物种多样性受到了林火的影响，且中度火烧有利于灌木层物种多样性的增加。各个火烈度间，多样性指数存在不同差异（$P < 0.05$），在 Shannon 指数中，中度、重度火烧显著高于轻度火烧，中度火烧显著高于对照；在 Simpson 指数、Pielou 指数中轻度火烧显著低于中度、重度火烧和对照；在 Margalef 指数中，中度、重度火烧显著高于轻度火烧和对照。随着火烈度的增加，4 种多样性指数呈现出一定的变化规律，Simpson 指数、Margalef 指数、Shannon 指数的变化趋势均为中度 >

表 2 火烈度对不同灌木层物种多样性的影响

Tab. 2 Effects of fire severity on species diversity in different shrub layers

火烈度 Fire severity	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Simpson指数 Simpson index	Pielou指数 Pielou index	Margalef指数 Margalef index
轻度 Mild	0.64 ± 0.07c	0.40 ± 0.07b	0.59 ± 0.07b	0.52 ± 0.05b
中度 Moderate	1.65 ± 0.13a	0.74 ± 0.04a	0.82 ± 0.02a	1.43 ± 0.21a
重度 Severe	1.44 ± 0.08ab	0.73 ± 0.03a	0.90 ± 0.05a	1.36 ± 0.10a
对照 Control	1.12 ± 0.05b	0.64 ± 0.02a	0.81 ± 0.03a	0.74 ± 0.01b

注：同列不同字母表示不同火烈度间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Notes: different letters in the same column mean significant differences between varied fire severities at 0.05 level. The same below.

重度 > 对照 > 轻度，且均在中度火烧时出现最大值，Pielou 指数呈现出重度 > 中度 > 对照 > 轻度的趋势，在重度火烧时出现最大值。

2.2 不同火烈度间灌木层叶功能性状

对外业采集的优势灌木叶片进行室内测定获取叶功能性状值，并按物种相对多度进行加权获得群落水平的叶功能性状值。基于叶功能性状值及变异系数计算公式（变异系数 = 标准差/平均值 × 100%）进行计算，得到每个性状的变异系数，结果见表 3，对不同火烈度间群落水平的叶功能性状值进行单因素方差分析和多重比较，结果见图 1。

变异系数划分[20,30]：弱变异为变异系数小于 20%；中变异为变异系数在 20% 至 50% 之间；强变异为变异系数大于 50%。由表 3 可知，除比叶面积为变异系数 20.30% > 20% 为中变异外，其余功能性状的变异系数均小于 20% 为弱变异，其中，叶有机碳含量变异系数最小，仅为 5.00%，按照变异系数的大小排列，顺序为比叶面积 > 氮磷比（18.00%）> 叶氮含量（16.60%）> 叶厚度 = 叶磷含量（15.00%）> 叶钾含量（13.60%）> 叶干物质含量（6.50%）> 叶有机碳含量。

由图 1 可知，不同火烈度对大部分灌木层植物叶功能性状存在显著影响，随着火烈度的逐渐增加，叶干物质含量、叶磷含量、叶厚度呈现逐步增大的变化趋势。在叶干物质含量中，重度火烧相比轻度火烧和对照显著增加 11%、17%，中度火烧与对照相比显著增加 12%；在叶磷含量中，重度火烧相比其他火烈度显著增大 21% ~ 39%；叶厚度在重度火烧时与其他火烈度相比差异显著，中度火烧相比轻度火烧、对照差异显著。比叶面积、叶氮含量、氮磷比随着火烈度的增加，变化趋势均为先减小后增大再减小，其中比叶面积在重度火烧时显著低于中度火烧 30% 和对照 38%，轻度火烧仅显著低于对照 21%；氮磷比在轻度火烧时相较于中度火烧及对照显著下降 22%、23%，而重度火烧相较于中度火烧及对照则显著下降 30%、31%；中度火烧的叶氮含量是各火烈度中最多的，与轻度火烧相比显著提高 43%。随着火烈度增加，叶有机碳含量呈现先减小后增大的变化趋势，在中度火烧时比重度火烧低 9%，比对照低 8%。火烈度对叶钾含量影响不显著。

2.3 叶功能性状与物种多样性的相关性分析

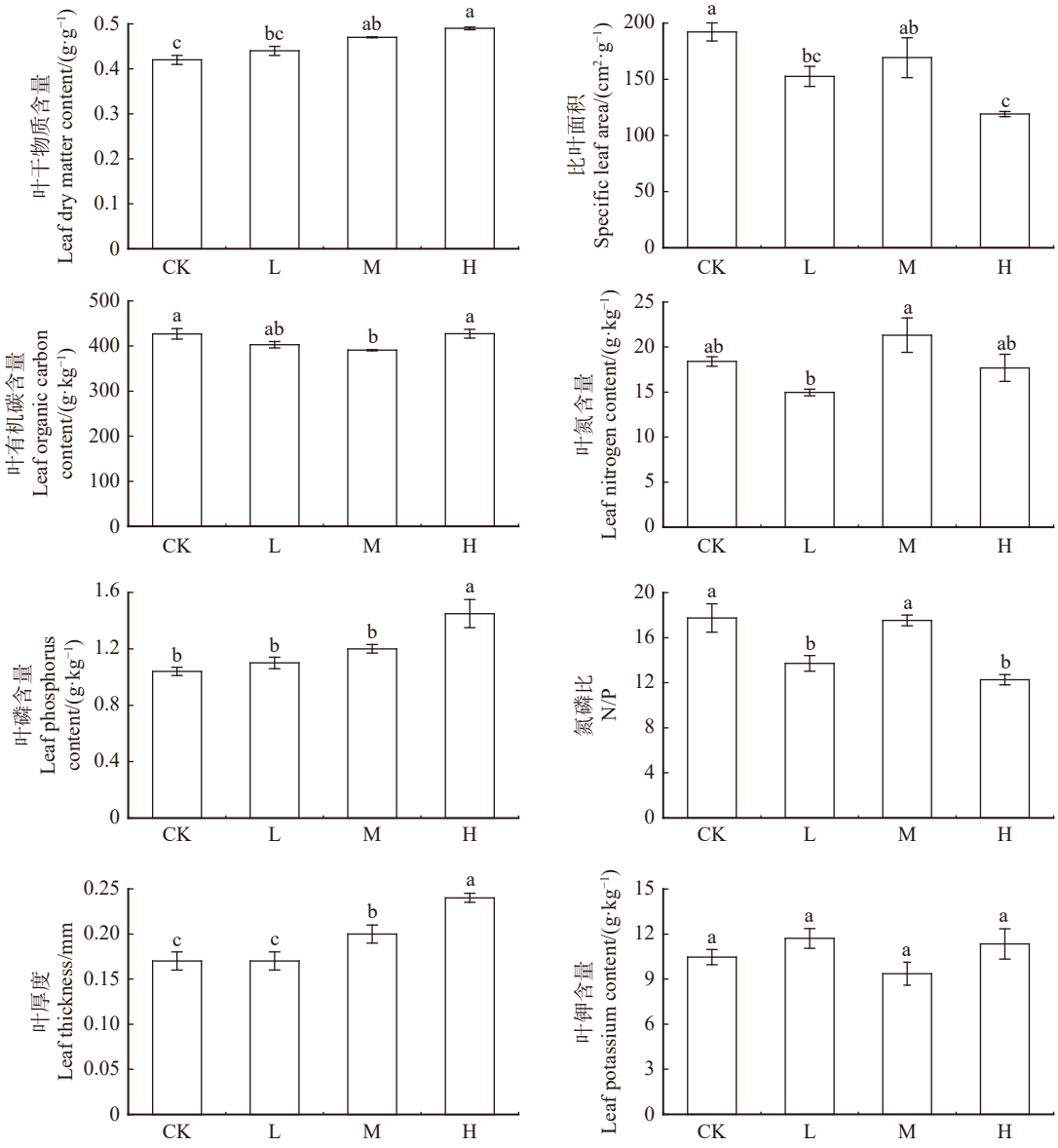
基于 Pearson 相关性分析对每个样地计算得到的物种多样性指数与叶功能性状值等数据进行分析，结果见图 2。

物种多样性间、叶功能性状间及物种多样性与叶功能性状间存在较强的相关性。Shannon 指数、Simpson 指数、Pielou 指数三者之间极显著正相关；Margalef 指数与 Pielou 指数显著正相关，而与 Simpson 指数、Shannon 指数极显著正相关；叶干物质含量与叶厚度间呈极显著正相关；比叶面积与叶厚度、叶干物质含量显著负相关；叶厚度与物种多样性指数间均显著正相关，叶干物质含量与 Margalef 指数显著正相关，叶厚度、叶干物质含量均与叶磷含量极显著正相关；叶氮含量与 Shannon 指数极显著正相关，与 Simpson 指数、Margalef 指数显著正相关；叶磷含量与 Margalef 指数极显著正相关；氮磷比与比叶面积极显著正相关，与叶氮含量显著正相关，与叶钾含量显著负相关。

表 3 灌木层叶功能性状的变异系数

Tab. 3 Variation coefficients of leaf functional traits of shrub layer

性状 Trait	叶厚度 Leaf thickness	叶干物质含量 Leaf dry matter content	比叶面积 Specific leaf area	叶有机碳含量 Leaf organic carbon content	叶氮含量 Leaf nitrogen content	叶磷含量 Leaf phosphorus content	叶钾含量 Leaf potassium content	氮磷比 N/P
变异系数 CV/%	15.00	6.50	20.30	5.00	16.60	15.00	13.60	18.00



L.轻度火烧; M.中度火烧; H.重度火烧; CK.对照。不同小写字母表示不同火烈度间差异显著($P < 0.05$)。L, mild burning; M, moderate burning; H, severe burning; CK, control. Different lowercase letters mean significant differences among varied fire severities at $P < 0.05$ level.

图 1　不同火烈度下灌木层叶功能性状值

Fig. 1　Leaf functional trait values of shrub layer under different fire severities

2.4　叶功能性状与物种多样性的多元逐步回归分析

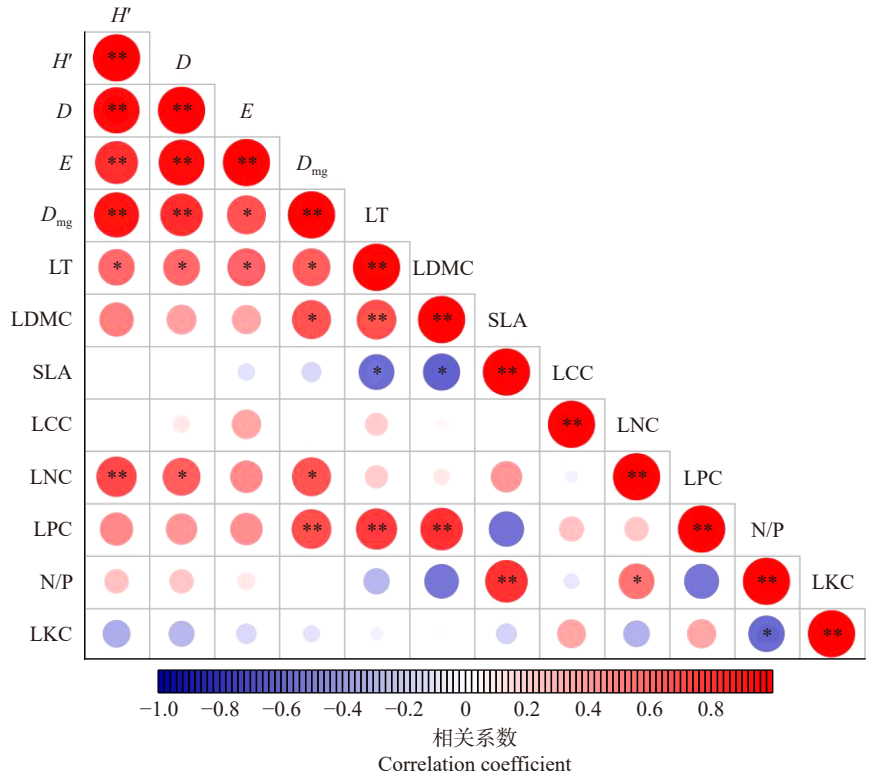
基于叶功能性状值与多样性指数等数据，利用多元逐步回归分析，建立线性回归模型，结果见表 4，其中，偏回归系数的大小表示指标的影响程度。

由多元逐步回归分析(表 4)可知，不同叶功能性状对物种多样性的影响不同。其中 Shannon 指数、Simpson 指数都主要受到叶氮含量、叶厚度的影响，叶氮含量在逐步回归方程中的偏回归系数分别为 0.086、0.28；叶厚度在逐步回归方程中的偏回归系数分别为 5.728、2.355；Pielou 指数主要受到叶厚度的影响，其偏回归系数为 2.74；Margalef 指数主要受到叶磷含量、氮磷比、叶干物质含量的影响，叶磷含量的偏回归系数为 1.612，氮磷比的偏回归系数为 0.112，叶干物质含量的偏回归系数为 7.428。

3　讨　　论

3.1　火烈度对灌木层物种多样性的影响

灌木层物种多样性的变化可以体现不同火烈度对灌木层的影响。本研究发现，在轻度火烧时物种多样性指数相比对照均有一定程度的降低，这与栗马玲等[9]、孙家宝等[31]、陈思帆等[32]的研究结果一致，造成这一现象的原因可能是轻度火烧会对径阶小的乔木造成破坏，使得林分郁闭度有所下降，增加林下灌木层植被的光照，利于灌木层植被的生长，但



*P < 0.05，**P < 0.01。H'. Shannon-Wiener 指数；D. Simpson 指数；E. Pielou 指数；D_{mg}. Margalef 指数；LT. 叶厚度；LDMC.叶干物质含量；SLA.比叶面积；LCC.叶有机碳含量；LNC.叶氮含量；LPC.叶磷含量；N/P.氮磷比；LKC.叶钾含量。下同。* means P < 0.05, ** means P < 0.01. H', Shannon-Wiener index; D, Simpson index; E, Pielou evenness index; D_{mg}, Margalef index; LT, leaf thickness; LDMC, leaf dry matter content; SLA, specific leaf area; LCC, leaf organic carbon content; LNC, leaf nitrogen content; LPC, leaf phosphorus content; N/P, N and P ratio; LKC, leaf potassium content. The same below.

图 2 叶功能性状与物种多样性的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of leaf functional traits and species diversity

表 4 叶功能性状与物种多样性的多元逐步回归分析

Tab. 4 Multiple stepwise regression analysis of leaf functional traits and species diversity

逐步回归方程 Stepwise regression equation	决定系数 Determination coefficient (R^2)	检验统计量 Test statistic (F)	显著性 Significance (P)
$H' = 0.086N + 5.728T - 1.474$	0.726	11.903	0.003
$D = 0.28N + 2.355T - 0.347$	0.805	8.297	0.009
$E = 2.74T + 0.239$	0.424	7.367	0.022
$D_{mg} = 1.612S + 0.112B + 7.428M - 6.032$	0.868	17.530	< 0.001

注：N.叶氮含量；T.叶厚度；S.叶磷含量；B.氮磷比；M.叶干物质含量 。Notes: N, leaf nitrogen content; T, leaf thickness; S, leaf phosphorus content; B. N and P ratio; M, leaf dry matter content.

较为高大的灌木会与矮小灌木形成竞争关系，限制矮小灌木的生长，且受到地表火的影响，矮小灌木被破坏，使得灌木层植物的多样性有所下降[31]。在本研究中，Shannon 指数、Simpson 指数与 Margalef 指数在中度火烧时出现最大值[9,32]，符合中度干扰假说，因为中度火烧会对乔木层造成一定程度的破坏，林分密度、郁闭度明显减小，光照增加，林下灌木层植被的生长空间得到释放，有利于种子的萌发以及外来物种的入侵，增加了物种多样性，而 Shannon 指数、Simpson 指数、Margalef 指数在重度火烧迹地呈现下降趋势，可能是重度火烧烧毁了大量植物，林分冠层遭到破坏，改变了群落原有的结构，虽然重度火烧迹地内阳光充足，为喜光植物的入侵提供了有利条件，但无法在短时间内恢复到过往的物种水平，因而物种多样性指数会降低[14]。Pielou 指数在重度火烧时达到最大，与郑大柽等[29]的研究结果不一致，造成这一结果可能是重度火烧将地表枯枝落叶等凋落物烧光，使得土地大面积裸露，有利于提高种子的传播效率，燃烧后土壤表面的高温，促进休眠种子的萌发，使得火烧迹地在植被恢复过程中，群落呈现单优物种，均匀分布[33]，从而提高均匀度指数。

3.2 火烈度对叶功能性状的影响

林火会改变森林的生态环境，植物由于环境的变化会选择不同的响应策略表现出不同的适应性

状[34]。比叶面积和叶干物质含量影响植物的生长和发育、养分的保存和资源的利用效率[35]; 叶厚度反映了植物储存和利用养分的能力。在本研究中, 比叶面积的变异系数最大达到 20.30% 属于中变异, 叶干物质含量、叶厚度仅 6.50%、15.00% 为弱变异, 可能是重度火烧后喜光的灌木占据主要生态位, 而对照样地的郁闭度较高, 喜光的灌木数量减少, 所以比叶面积的变异系数最大。叶干物质含量与叶厚度对资源的获取上较为稳定, 所以变异较弱, 与顾泽等[20]研究结论相似。在重度火烧后叶干物质含量、叶厚度显著高于对照, 随着火烈度的增大, 叶干物质含量、叶厚度逐渐增加, 而比叶面积显著小于对照, 这是由于重度火烧迹地生境脆弱、资源匮乏, 灌木植物为优先提高成活率而采取资源保守型策略, 需要减小比叶面积来提升热交换能力、降低灌木植物的蒸腾作用, 达到减少灌木体内水分流失的目的, 通过增大叶干物质含量、叶厚度提升灌木叶片的防御能力, 如提高叶肉细胞密度、强化叶片防御结构等。因此, 灌木采取减小比叶面积、增大叶干物质含量、叶厚度的策略, 增强自身抵御外界恶劣、复杂多变的环境。与栗马玲等[9]、郑大柽等[29]的研究结果一致。

碳、氮、磷、钾作为植物所必需的元素, 对植物的生长、发育和繁殖等过程具有重要影响, 对群落的构建和生态系统的维持具有重要作用[29,36]。在本文的研究中, 叶有机碳含量的变异系数最小仅有 5.0%, 这与顾泽等[20]、余林兰等[37]的研究结果相似, 分析得出碳是构成植物骨架的基础, 其本身便具有一定的稳定性[37]。中度火烧后林分稀疏, 透光率变大, 给了林下喜光的灌木更大的生长空间, 而生长速率假说认为碳氮比越大, 植物的生长速率越低, 反之生长速率越高[38]。中度火烧时的叶有机碳含量显著低于对照, 而叶氮含量在中度火烧时高于对照, 因此对照的碳氮比大于中度火烧的碳氮比, 证明灌木在中度火烧迹地的生长速率高于对照。随着火烈度的不断增大, 叶磷含量也在逐渐增加, 并在重度火烧达到最大, 同时, 重度火烧时的叶磷含量显著高于其他火烈度。这可能是由于重度火烧后, 灌木维持自身的生理活动, 需要磷元素参与并合成有机物, 使得叶片磷含量增加[29], 且外来喜光灌木在入侵后会通过增大磷元素的比例[36], 强化自身的繁殖能力, 抢占原有植被的生态位, 成为优势灌木。叶片的氮磷比常被用来表示叶片受氮与磷元素限制的状况, 研究表明, 当植物叶片的氮含量与磷含量的比值小于 14 时, 植物的生长受到氮元素的限制; 当植物叶片的氮含量与磷含量之比处于 14 至 16 之间时, 氮元素和磷元素会同时限制植物的生长; 当植物叶片的氮含量与磷含量的比值大于 16 时, 植物的生长受到磷元素的限制[39]。在本文的研究结果中, 重度火烧后氮磷比显著低于对照, 且氮磷比为 12.26 < 14, 证明样地内的灌木受到氮元素的限制, 在一定程度上也能够表示重度火烧后迹地内的灌木正处于恢复阶段[19], 未来在重度火烧的区域可以考虑通过增加氮的输入, 促进植被的恢复。在本次的研究中, 虽然叶钾含量在不同烈度间没有显著的差异, 但火烈度在总体上增加了钾的含量, 有研究表明, 钾元素有助于植物抵御干旱[36], 猜测火烧后, 由于冠层的稀疏, 林内环境温度上升, 湿度下降, 而导致钾含量的上升。

3.3　物种多样性与叶功能性状的关系

植物功能性状间的关系, 能够反映植物对多变环境的适应性; 物种多样性间的关系能够反映物种的丰富度和分布状况[35,40]。对于功能性状、物种多样性及其两者之间相关关系的研究, 有助于了解火烧后引起的环境变化对群落组成和群落构建的影响。本研究发现, 物种多样性指数之间的相关性较强, 基本呈现极显著正相关关系, 可能是植物与环境变化相互影响的结果[40], 火烧增加了环境异质性, 导致火烧迹地出现适应不同环境条件的植物, 增加了植物的种类。随着植物种类的增加, 种间竞争加剧, 出现优势物种。叶功能性状之间存在一定的关联性, 本研究中, 比叶面积与氮磷比呈显著正相关, 与叶干物质含量呈显著负相关, 与顾泽等[20]研究结果一致。叶干物质含量、叶厚度与叶磷含量呈极显著正相关, 可能是火烧后植物采取资源保守型策略, 形成又小又厚的叶片增强对环境的抵抗性, 过程需要更多的磷元素参与到机械结构的构建, 加深了叶磷含量与叶干物质含量、叶厚度的联系。前文提到叶钾含量可能会增强植物的抵抗性, 当植物更倾向于资源的储存而非其本身的快速生长时, 会提高其叶钾含量, 抑制氮磷比, 由此可解释叶钾含量与氮磷比呈现显著负相关。曹嘉瑜等[8]认为灌木性状主要由物种和环境交叉作用, 因此, 多样性指数与叶功能性状有较强的相关性。本研究的物种多样性指数主要受叶氮含量、叶厚度、叶干物质含量、叶磷含量及氮磷比的影响, 贡献率最高为 0.868, 可能是物种应对环境的变化会选择一套最佳的功能性状组合, 转换生态策略, 影响物种多样性。

4　结　　论

火烈度对灌木层植物的物种多样性具有显著影响, 中度火烧相较于对照提高了灌木群落的优势度、丰富度, 有利于维持物种的多样性; 火烈度对灌木层植物的叶功能性状具有显著影响, 中度火烧相较于

对照显著提高了叶厚度、叶干物质含量、叶有机碳含量、叶磷含量、叶氮含量，降低了比叶面积、氮磷比，通过改变灌木层植物的叶功能性状进而调整其生存策略，有助于灌木植物的恢复；物种多样性与叶功能性状之间存在较强的耦合关系，其中，物种多样性主要会受到叶干物质含量、叶厚度、叶氮含量、叶磷含量及氮磷比的影响，不同物种通过不同性状组合适应火后环境，造成物种多样性的变化。

参 考 文 献

[1] 舒立福, 田晓瑞, 寇晓军. 林火研究综述 (Ⅰ): 研究热点与进展 [J]. 世界林业研究, 2003, 16(3): 37−40.
Shu L F, Tian X R, Kou X J. The focus and progress on forest fire research[J]. World Forestry Research, 2003, 16(3): 37−40.

[2] Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, et al. Fire in the earth system[J]. Science, 2009, 324: 481−484.

[3] 张宇婧, 吴志伟, 顾先丽, 等. 火烧强度和火后恢复时间对大兴安岭森林土壤有机碳含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2455−2462.
Zhang Y J, Wu Z W, Gu X L, et al. Effects of fire severity and recovery time on organic carbon content of forest soil in Great Xing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2455−2462.

[4] 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 等. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 28−34.
Chang Y, Chen H W, Hu Y M, et al. Advances in the assessment of forest fire severity and its spatial heterogeneity[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 28−34.

[5] 马云辉, 马长明, 冯淑瑶, 等. 河北省蒙古栎次生林林下可燃物负荷量及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2082−2090.
Ma Y H, Ma C M, Feng S Y, et al. Understory fuel loads and the impact factors of *Quercus mongolica* natural secondary forest in Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(8): 2082−2090.

[6] 祁鲁玉, 陈浩楠, 库丽洪·赛热别力, 等. 基于植物功能性状的暖温带 5 种灌木幼苗生长策略 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(11): 1388−1399.
Qi L Y, Chen H N, Kulihong Sairebieli, et al. Growth strategies of five shrub seedlings in warm temperate zone based on plant functional traits[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(11): 1388−1399.

[7] Landuyt D, Ampoorter E, Bastias C C, et al. Importance of overstorey attributes for understorey litter production and nutrient cycling in European forests[J]. Forest Ecosystems, 2020, 7(4): 591−601.

[8] 曹嘉瑜, 刘建峰, 袁泉, 等. 森林与灌丛的灌木性状揭示不同的生活策略 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(7): 715−729.
Cao J Y, Liu J F, Yuan Q, et al. Traits of shrubs in forests and bushes reveal different life strategies[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(7): 715−729.

[9] 栗马玲, 宋沼鹏, 刘艳红, 等. 火烧强度对兴安落叶松群落叶片功能性状及功能多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4021−4030.
Li M L, Song Z P, Liu Y H, et al. Effects of fire intensity on leaf functional traits and functional diversity of *Larix gmelinii* community[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4021−4030.

[10] Lim B K, Engstrom M D. Species diversity of bats (Mammalia: Chiroptera) in Iwokrama forest, Guyana, and the Guianan subregion: implications for conservation[J]. Biodiversity and Conservation, 2001, 10(4): 613−657.

[11] 刘梦, 陈芳清, 王玉兵, 等. 广西中部 7 种典型灌丛群落的物种多样性特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(2): 157−163.
Liu M, Chen F Q, Wang Y B, et al. Species biodiversity of seven typical shrub communities in the middle of Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(2): 157−163.

[12] Fernández-García V, Marcos E, Fulé P Z, et al. Fire regimes shape diversity and traits of vegetation under different climatic conditions[J/OL]. The Science of the Total Environment, 2020, 716: 137137[2023−08−10]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137137.

[13] 赵蔓, 张晓曼, 杨明洁. 林火干扰对油松针叶林物种多样性与土壤理化性质的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7412−7421.
Zhao M, Zhang X M, Yang M J. Effects of forest fire disturbance on species diversity and soil physicochemical properties in *Pinus tabuliformis* coniferous forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7412−7421.

[14] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 不同火烧强度迹地林下灌草层物种多样性及其与土壤因子的关系 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(1): 130−140.
Chen X X, Li H L, Dong Z, et al. Relationship of shurbs and herbs species diversity under different fire intensities with soil factors[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(1): 130−140.

[15] Jens K, Gerhard B, Sandra D, et al. TRY plant trait database–enhanced coverage and open access[J]. Global Change Biology, 2019, 26(1): 119−188.

[16] Bernard-Verdier M, Navas M L, Vellend M, et al. Community assembly along a soil depth gradient: contrasting patterns of plant trait convergence and divergence in a Mediterranean rangeland[J]. Journal of Ecology, 2012, 100(6): 1422−1433.

[17] Sack L, Scoffoni C, John G P, et al. How do leaf veins influence the worldwide leaf economic spectrum? Review and synthesis[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(13): 4053−4080.

[18] 黄庆阳, 谢立红, 曹宏杰, 等. 五大连池火山山杨叶功能性状的变异特征 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 81−89.
Huang Q Y, Xie L H, Cao H J, et al. Variation characteristics of leaf functional traits of *Populus davidiana* in Wudalianchi Volcano, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 81−89.

[19] 孙龙, 包满意, 胡同欣, 等. 火烧强度对白桦枝叶生态化学计量特征的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(3): 64−69, 76.
Sun L, Bao M Y, Hu T X, et al. Effects of fire intensity on ecological stoichiometric characteristics of twigs and leaves of *Betula platyphylla*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(3): 64−69, 76.

[20] 顾泽, 王博, 陈思帆, 等. 不同火烈度火烧迹地内油松叶功能性状的变化 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1497−1504.
Gu Z, Wang B, Chen S F, et al. Changes of leaf functional traits of *Pinus tabuliformis* in burned areas with different fire severities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6):

1497−1504.

[21] Kaewsong K, Johnson D J, Bunyavejchewin S, et al. Fire impacts on recruitment dynamics in a seasonal tropical forest in Continental Southeast Asia[J/OL]. Forests, 2022; 13(1): 116 [2023−09−13]. https://doi.org/10.3390/f13010116.

[22] Song Z P, Tian H X, Li Z L, et al. Changes in plant nutrient utilization during ecosystem recovery after wildfire[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2021, 295. 112994[2023−08−21]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112994.

[23] Wang X G, Lu X T, Han X G. Responses of nutrient concentrations and stoichiometry of senesced leaves in dominant plants to nitrogen addition and prescribed burning in a temperate steppe[J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 154–161.

[24] 金山, 武帅楷. 太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4182−4193.
Jin S, Wu S K. The plant community structure of burned *Pinus tabuliformis* forest in Taiyue Mountainin the early ecological restoration stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4182−4193.

[25] 褚燕琴, 牛树奎, 陈锋, 等. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(1): 96−103.
Chu Y Q, Niu S K, Chen F, et al. Fire disturbance and environmental factors for the undergrowth in a *Pinus tabulaeformis* forest[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(1): 96−103.

[26] 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.
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.

[27] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany, 2013, 61(3): 167−234.

[28] 宁虎森, 罗青红, 吉小敏, 等. 新疆甘家湖梭梭林碳、氮、磷、钾生态化学计量特征 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 68−73.
Ning H S, Luo Q H, Ji X M, et al. Stoichiometry characteristic on carbon, nitrogen, phosphorus and potassium of Ganjiahu *Haloxylon ammodendron* stand in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 68−73.

[29] 郑大柽, 秦倩倩, 邱聪, 等. 重度火烧 1 年后林下植被的物种多样性及叶功能性状 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(6): 1601−1607.
Zheng D C, Qin Q Q, Qiu C, et al. Species diversity and leaf functional traits of understory vegetation one year after severe burning[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2022, 28(6): 1601−1607.

[30] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2016, 44(2): 68−76, 82.
Qin J, Kong H Y, Liu H. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(2): 68−76, 82.

[31] 孙家宝, 张海林, 胡海清. 火干扰强度对兴安落叶松林物种组成及多样性的影响 [J]. 森林工程, 2009, 25(6): 1−5.
Sun J B, Zhang H L, Hu H Q. Effect of fire disturbance intensity on species composition and species diversity of *Larix gmelinii* forest in Daxing'anling Mountain[J]. Forest Engineering, 2009, 25(6): 1−5.

[32] 陈思帆, 高健, 高敏, 等. 火烧强度对山西太岳山油松林地表可燃物的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(10): 68−77.
Chen S F, Gao J, Gao M, et al. Effects of fire intensity on surface fuel of *Pinus tabuliformis* in Taiyue Mountain, Shanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2022, 50(10): 68−77.

[33] 王娟, 陈文业, 谈嫣蓉, 等. 火干扰对内陆荒漠湿地芦苇群落特征的影响 [J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 770−776.
Wang J, Chen W Y, Tan Y R, et al. Effect of fire disturbance on reed (*Phragmites australis* Trin) community characteristics in inland desert wetland[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 770−776.

[34] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境和生态系统功能 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 150−165.
Meng T T, Ni J, Wang G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 150−165.

[35] 黄林娟, 于燕妹, 安小菲, 等. 天坑森林植物群落叶功能性状、物种多样性和功能多样性特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10264−10275.
Huang L J, Yu Y M, An X F, et al. Leaf functional traits, species diversity and functional diversity of plant community in Tiankeng forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10264−10275.

[36] 李兆光, 杨文高, 和桂青, 等. 滇西北藜麦氮磷钾生态化学计量特征的物候期动态 [J]. 植物生态学报, 2023, 47(5): 724−732.
Li Z G, Yang W G, He G Q, et al. Phenological dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium stoichiometry in *Chenopodium quinoa* in northwest Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(5): 724−732.

[37] 余林兰, 罗奕杏, 薛跃规, 等. 神木天坑不同小生境木本植物叶功能性状的差异与关联 [J]. 广西植物, 2023, 43(3): 494−503.
Yu L L, Luo Y X, Xue Y G, et al. Differences and correlations in leaf functional traits of woody plants in different microhabitats of Shenmu Tiankeng[J]. Guihaia, 2023, 43(3): 494−503.

[38] 巴格登, 王文栋, 许仲林, 等. 喀纳斯天然林乔灌草叶片及土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8749−8758.
Ba G D, Wang W D, Xu Z L, et al. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and soil in Kanas natural forests of Xinjiang Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8749−8758.

[39] Güsewell S. N∶P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243−266.

[40] 喻阳华, 钟欣平, 郑维, 等. 喀斯特森林不同演替阶段植物群落物种多样性、功能性状、化学计量及其关联 [J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2408−2417.
Yu Y H, Zhong X P, Zheng W, et al. Species diversity, functional traits, stoichiometry and correlation of plant community in different succession stages of karst forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2408−2417.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）