

DOI: 10.5846/stxb202001230170

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. 生态学报, 2021, 41(10): 4182-4193.

Jin S, Wu S K. The plant community structure of burned *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain in the early ecological restoration stage. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4182-4193.

太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征

金 山^{1,2,*}, 武帅楷^{1,2}

1 长治学院生物科学与技术系, 长治 046011

2 太行山生态与环境研究所, 长治 046011

摘要:为研究山西太岳山油松(*Pinus tabulaeformis*)林过火后恢复初期林下草本植物群落结构,以 2019 年 3 月太岳山油松林火烧迹地为研究对象,采用群落相似性指数、多样性指数、稳定性系数、TWINSPAN 数量分类和 DCA 排序等方法对群落组成、多样性、类型及稳定性等进行了研究。结果表明:(1)火烧迹地恢复初期以低矮灌木和多年生草本植物为主,其中又以地面芽植物占比最大。优势植物主要为大披针藁草(*Carex lanceolata*)和多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*);(2)火烧迹地恢复初期各样地植物群落相似性系数和多样性指数相对较小,均匀度指数较大,但各样地恢复效果不尽相同,样地 6 和样地 7 的植物群落各项指标相对大于其他样地;(3)TWINSPAN 数量分类将火烧迹地植物群落划分成:I. 大披针藁草+南牡蒿(*Artemisia eriopoda*)+地榆(*Sanguisorba officinalis*)群落、II. 多花胡枝子+大披针藁草+二色棘豆(*Oxytropis bicolor*)群落、III. 多花胡枝子+大披针藁草+米口袋(*Geldenstaedtia verna*)群落、IV. 多花胡枝子+大披针藁草+芥苣(*Adenophora tracheloides*)群落、V. 大披针藁草+白莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)+狗娃花(*Aster hispidus*)群落、VI. 白莲蒿群落、VII. 大披针藁草+狗娃花+野艾蒿(*Artemisia lavandulifolia*)群落;(4)DCA 排序结果表明,火烧迹地恢复初期植物群落结构单一,沿样地和坡位变化较小,仅区分出样地 7 和其他样地两大类植物群落。(5)火烧迹地恢复初期植物群落处于不稳定的状态,但各样地间群落稳定性存在一定差别,其中样地 1 最大,样地 5 最小。总之,研究区植物群落处于演替初期,各样地间植物群落稳定性较差,多样性和整体相似性较小,但优势种群相似性较高,植物群落结构仍处于动态变化之中。研究揭示了太岳山火烧迹地恢复初期植物群落结构特征,积累了该区域火烧迹地植物群落生态学数据,同时可为该区域生态恢复提供科学依据。

关键词:火烧迹地; 恢复初期; 物种组成; 多样性; 稳定性

The plant community structure of burned *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain in the early ecological restoration stage

JIN Shan^{1,2,*}, WU Shuaikai^{1,2}

1 Faculty of Biological Science and Technology, Changzhi University, Changzhi 046011, China

2 Ecological and Environmental Research Institute of Taihang Mountain, Changzhi 046011, China

Abstract: To study the community structure of understory herbaceous plants in the early recovery stage after the fire, the burned *Pinus tabulaeformis* forests areas of Taiyue Mountain in March 2019 were selected to investigate the plant community structure at the early ecological restoration stage. The community similarity index, diversity index, stability index, TWINSPAN, and DCA were employed for analyzing the structure, diversity, and stability of plant communities. Our results show that in the early restoration stage, the shrub, and perennial grass were dominants in the communities, among which the hemicryptophytes accounted for the largest proportion. The dominant species were *Carex lanceolata* and *Lespedeza floribunda*. Furthermore, the similarity coefficient and diversity index of plant community in seven sample plots were

基金项目:山西省 1331 重点学科建设项目(1331KSC)

收稿日期:2020-01-23; 网络出版日期:2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinshan0355@163.com

generally small, while the evenness index was comparably higher. However, the plant community feature among seven plots existed heterogeneity, and all indicators of plant communities in plot 6 and 7 were relatively higher than those in other sample plots. Moreover, seven plant community patterns were identified by the TWINSpan method, including I. *Carex lanceolata* + *Artemisia eriopoda* + *Sanguisorba officinalis* community, II. *Lespedeza floribunda* + *Carex lanceolata* + *Oxytropis bicolor* community, III. *Lespedeza floribunda* + *Carex lanceolata* + *Gueldenstaedtia verna* community, IV. *Lespedeza floribunda* + *Carex lanceolata* + *Adenophora tracheloides* community, V. *Carex lanceolata* + *Artemisia stechmanniana* + *Aster hispidus* community, VI. *Artemisia stechmanniana* community, and VII. *Carex lanceolata* + *Aster hispidus* + *Artemisia lavandulifolia* community. The result of DCA ordination suggested that the plant community structures at the early ecological restoration stage of burned areas were simple; only a minor change occurred with plots and slope position. Among them, only plot 7 and the other two groups of plant communities were significantly different. The results further depicted that in the early recovery stage, the plant community was in an unstable state; the stability indexes in different sample plots were much different, with the highest value in plot 1 and lowest in plot 5. In conclusion, the plant community in the burned *Pinus tabulaeformis* forests areas, whose structure is under dynamic changing, was still at an early stage of succession accompanied by poor stability and low diversity and similarity, but the dominant population has a high similarity, and the plant community structure is still in dynamic change. Our finding shighlights the characteristics of the plant community structure in the burned area of Taiyue Mountain at the early stage of restoration, accumulates ecological data of the plant community in the burned area, and can provide a scientific basis for ecological restoration in this area.

Key Words: burned areas; early ecological restoration stage; species composition; species diversity; community stability

森林火灾极大地影响了森林生态系统的土壤理化性质及生物群落的多样性、稳定性和动态变化^[1],是世界性的重大灾害,而且中国是世界上森林火灾多发的国家之一^[2]。我国森林火灾分布区域主要为西南、华中南、东南以及东北地区^[3]。生物群落结构是生态系统研究中的基础且重要的一部分,在生物群落中,各种群协同进化,占据不同空间,使群落具有一定结构,包括垂直结构、水平结构和时间结构^[4]。种类组成、物种多样性、群落类型、稳定性等用来表征群落结构特征,尤其是物种多样性,其既能反映群落的内部结构特征,也可以表现出群落的演替阶段及稳定程度,同时也是反映群落功能的重要指标,一直都是群落生态学和恢复生态学领域的研究热点^[5]。火灾后,森林生态系统遭到不同程度破坏,开始新一轮演替,研究群落结构变化可以揭示火烧干扰后森林生态系统恢复的程度。国内外学者对火烧迹地的研究主要包括:森林火灾风险的预测及评估^[6]、运用遥感等技术手段研究火烧迹地的时间和空间特征^[7]、利用光谱分析法研究火灾严重程度^[8]和火灾后植被盖度恢复^[9]、火烧迹地土壤的斥水性和渗透性特征^[10]、土壤温室气体特征^[11]、土壤节肢动物^[12]、马尾松(*Pinus massoniana*)林和油松(*Pinus tabulaeformis*)林火烧迹地的土壤营养元素特征^[13-15]、高山栎(*Quercus semecarpifolia*)林火烧迹地的土壤呼吸^[16-17]、落叶松(*Larix gmelinii*)林火烧迹地地表 CO₂ 通量^[18]、火烧迹地植物群落多样性^[19]、群落演替^[20]以及火烧对当地植被的影响^[21]等。可见,目前学者们对火烧迹地的研究主要集中在土壤理化性质、土壤微生物^[22]和植物群落等方面,但是已有的研究缺乏对不同火烧强度和不同恢复时间植物群落动态变化规律的系统研究,而且现阶段对火烧迹地植被恢复程度评价的研究也存在一定的局限性^[23]。

山西太岳山林区在冬、春季容易出现干旱现象,极易发生森林火灾^[24],但对该区域火烧迹地植物群落动态变化的相关研究很少。基于此,本研究应用群落相似性指数、多样性指数、稳定性系数、TWINSpan 数量分类和 DCA 排序等方法研究太岳山油松林火烧迹地植物群落天然恢复初期的物种组成、物种多样性、群落类型和稳定性,了解太岳山区油松林火烧恢复初期植物群落结构特征,揭示火烧后林下植被恢复规律,以期以太岳山火烧迹地植被的恢复和重建以及太岳山区油松林生态系统的科学管理提供一定的理论依据。

1 研究区概况

研究区(图1)位于太岳山北麓,地理坐标:112°11'—112°22' E, 36°43'—36°51' N。区内沟壑纵横、地貌复杂,以黄土丘陵和土石山地为主,平均海拔约 1500 m。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 9℃,年平均降水量约 650 mm,无霜期约 125—130 d。主要植被类型为油松林和蒙古栎(*Quercus mongolica*)林,灌丛主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)灌丛、黄刺玫(*Rosa xanthina*)灌丛、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌丛等。研究区于 2019 年 3 月经历森林大火,过火面积达 6.67 km²,火烧后植物的地上部分全部死亡,只剩油松枯立木,林下腐殖质层全部烧尽,但土壤结构比较完整,植物地下繁殖体受损较小。火烧迹地外围几乎未受干扰,仍为油松林。

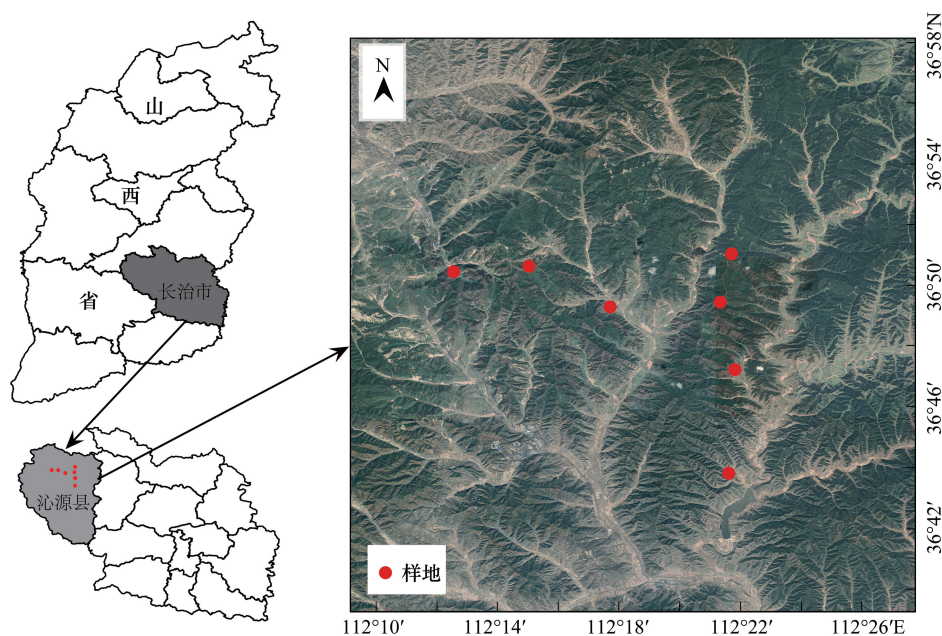


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

2 研究方法

2.1 采样方法

本文主要关注火烧迹地植物恢复生长一季后的草本层群落结构。于 2019 年 10 月初在研究区内选择 7 个样地进行调查(表 1),样地平均坡度约 30°,每个样地设置“100 m × 100 m”的调查区,定性记录调查区内出现的植物种名。在每个样地调查区内划分坡上、坡中、坡下 3 个坡位,在每个坡位分别设置 3 个“10 m × 10 m”的样格。在每个“10 m × 10 m”的样格中沿对角线设置 3 个“1 m × 1 m”的小样方,进行草本植物调查,记录每个小样方内草本植物的多度、高度、盖度等指标,同时记录经纬度、海拔、坡度、坡向等环境因子。

2.2 计算公式

2.2.1 群落相似性指数(C_j)

$$C_j = \frac{a}{a + b + c} \quad (1)$$

式中, a 为样地 A 和 B 共有种数, b 为样地 B 出现样地 A 没出现的种数, c 为样地 A 出现样地 B 没出现的种数。 C_j 的值域为[0,1]。相似性等级(表 2)一般划分为 6 级^[25]:

表 1 样地信息表

Table 1 Basic information of the sample plots

样地 Sample plots	经度 Longitude/E	纬度 Latitude/N	平均海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	覆盖度 Coverage/%	人为干扰 Human interference
1	112°12'44.42"	36°50'32.02"	1502	40	10	放牧
2	112°15'08.72"	36°50'38.33"	1602	25	15	—
3	112°17'52.83"	36°49'16.25"	1372	20	25	—
4	112°21'59.21"	36°51'10.22"	1530	25	20	放牧
5	112°21'36.19"	36°49'25.74"	1525	20	15	放牧
6	112°21'44.61"	36°44'0.81"	1225	25	30	放牧
7	112°22'03.58"	36°47'19.40"	1330	35	20	放牧

表 2 相似性指数(C_j)等级

Table 2 Similarity index classification

等级 Classification	1	2	3	4	5	6
意义 Mean	全不相似	极不相似	轻度相似	中度相似	极相似	完全相似
C_j	0.00	0.01—0.25	0.26—0.50	0.51—0.75	0.76—0.99	1.00

2.2.2 物种多样性指数选取 Shannon-Wiener 指数,其计算公式为

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, H' 为 Shannon-Wiener 指数; S 为生境内物种数; P_i 为物种 i 在群落中的相对重要值,其计算公式为: $P_i = (\text{相对多度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 3^{[26]}$ 。

2.2.3 物种 Pielou 均匀度指数(J)计算公式为

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

2.2.4 群落稳定性测定

采用 Godron 贡献定律法^[27],利用群落中所有植物的种类和频度数据进行计算。以植物种类累积百分比为 x 轴,以累积相对频度为 y 轴,建立模糊散点平滑曲线,再求其与直线 $y = 100 - x$ 的交点坐标,即为植物群落稳定点。交点坐标越接近(20,80),则群落稳定性越高^[28]。平滑曲线模型为:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

2.3 数据处理与统计分析

采用 EstimateS 9.0 软件绘制各个样地植物累积丰度与样方数量的模拟曲线。应用 PCORD 5 软件中 TWINSpan 分析对植物群落进行数量分类。利用 Origin 2016 软件绘制生活型组成、样方数量-植物累积丰度曲线和群落稳定性指数曲线。使用 Rstudio 软件对各样地的多样性指数进行多重比较分析以检验差异显著性大小,然后绘制箱型图,同时绘制优势种分布图及 DCA 排序图。

3 结果与分析

3.1 物种组成

3.1.1 生活型组成

研究区 7 个样地共记录 124 种植物,分属于 43 科 100 属,其中以菊科植物最为丰富,有 18 属 24 种,其次是豆科(8 属 16 种)、蔷薇科(12 属 15 种),这 3 科植物种数占总物种数的 44.35%。这 124 种植物中,木本植物 31 种,占植物总数的 25.00%,其中乔木 7 种,占种总数的 5.65%,灌木 24 种,占种总数的 19.35%;草本植物 93 种,占种总数的 75.00%。采用 Raunkiaer 生活型系统来比较植物生活型组成(图 2),发现火烧迹地恢复初

期一年生植物只占植物总种数的 12.10%, 多年生草本植物占绝对优势, 其中又以地面芽植物为主, 占到植物总种数的 42.74%。

3.1.2 优势种组成

根据实际调查情况, 将每个样地中平均重要值大于 8% 的物种确定为优势种, 共 9 种 (图 3), 分别为大披针藁草 (*Carex lanceolata*)、多花胡枝子 (*Lespedeza floribunda*)、芥苳 (*Adenophora trachelioides*)、米口袋 (*Gueldenstaedtia verna*)、二色棘豆 (*Oxytropis bicolor*)、地榆 (*Sanguisorba officinalis*)、白莲蒿 (*Artemisia stechmanniana*)、牻牛儿苗 (*Erodium stephanianum*) 和茜草 (*Rubia cordifolia*)。样地 1 和样地 2 包括 4 个优势种, 大披针藁草和多花胡枝子在 4 个样地中出现, 茜草、地榆、牻牛儿苗、白莲蒿则只在 1 个样地中出现。可见, 火烧迹地恢复初期各样地优势种不尽相同, 但大披针藁草和多花胡枝子为绝对优势种。

3.2 群落分类

3.2.1 TWINSpan 聚类

参照《中国植被》的分类系统, 根据火烧迹地恢复初期植物群落调查样方数据, 选择在样方中出现频率 $\geq 95\%$ 的 31 种植物重要值组成的植物群落矩阵, 进行 TWINSpan 分类。依据植物群落分类和命名原则, 结合调查结果分析的指示种和优势种命名群落类型, 将火烧迹地恢复初期植物群落在 3 级划分水平上分为 7 类 (图 4)。

I. 大披针藁草+南牡蒿+地榆群丛

包括 1、2、19—22、24、45、53、54、67 等 11 个样方, 主要分布在样地 3, 该群丛平均盖度约 10%, 均高约 0.15 m, 优势种为大披针藁草、南牡蒿、地榆, 主要伴生种有小红菊 (*Chrysanthemum chanetii*)、苍术 (*Atractylodes lancea*)、二色棘豆等。

II. 多花胡枝子+大披针藁草+二色棘豆群丛

包括 10—13、23、29、34、37—41、43、44、46—48、50—52、56 等 19 个样方, 主要分布在样地 5 和样地 6, 该群丛平均盖度约 10%, 均高约 0.10 m。优势种为多花胡枝子、大披针藁草, 伴生种主要有白莲蒿、华北前胡 (*Peucedanum harry-smithii*)、野韭 (*Allium ramosum*) 等。

III. 多花胡枝子+大披针藁草+米口袋群丛

包括 3—5、7—9、14、25—27、30—33、35、36 等 16 个样方, 主要分布于样地 1 和样地 4, 该群丛平均盖度约 7%, 均高约 0.05 m。优势种为多花胡枝子和大披针藁草, 伴生种主要有苍术、地榆、芥苳等。

IV. 多花胡枝子+大披针藁草+芥苳群丛

包括 6、11、12、15—18、28、42 等 9 个样方, 主要分布于样地 2, 该群丛平均盖度约 7%, 均高约 0.05 m。优势种为多花胡枝子、大披针藁草和芥苳, 伴生种主要有茜草、地榆、斑叶堇菜 (*Viola variegata*) 等。

V. 大披针藁草+白莲蒿+狗娃花群丛

包括 55、58、59、63 等 4 个样方, 主要分布于样地 7, 该群丛平均盖度约 30%, 均高约 0.25 m。优势种为大披针藁草、白莲蒿、狗娃花, 伴生种主要有桃叶鸦葱 (*Scorzonera sinensis*)、斑叶堇菜、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等。

VI. 白莲蒿群丛

包括 60 这 1 个样方, 分布于样地 7 的坡中, 该群丛平均盖度约 50%, 均高约 0.40 m。优势种为白莲蒿, 为

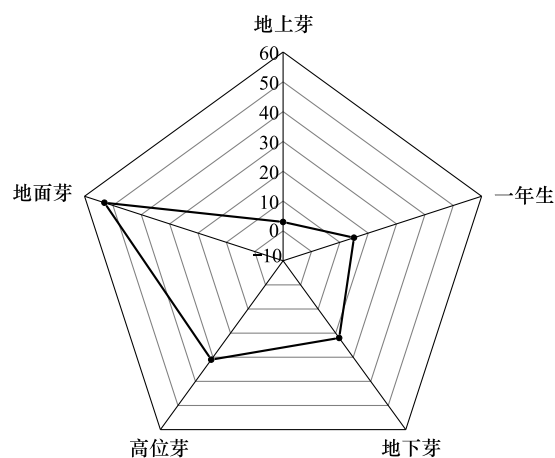


图 2 火烧迹地植物生活型组成

Fig.2 Plant life types in the burned area of *Pinus tabuliformis* forest

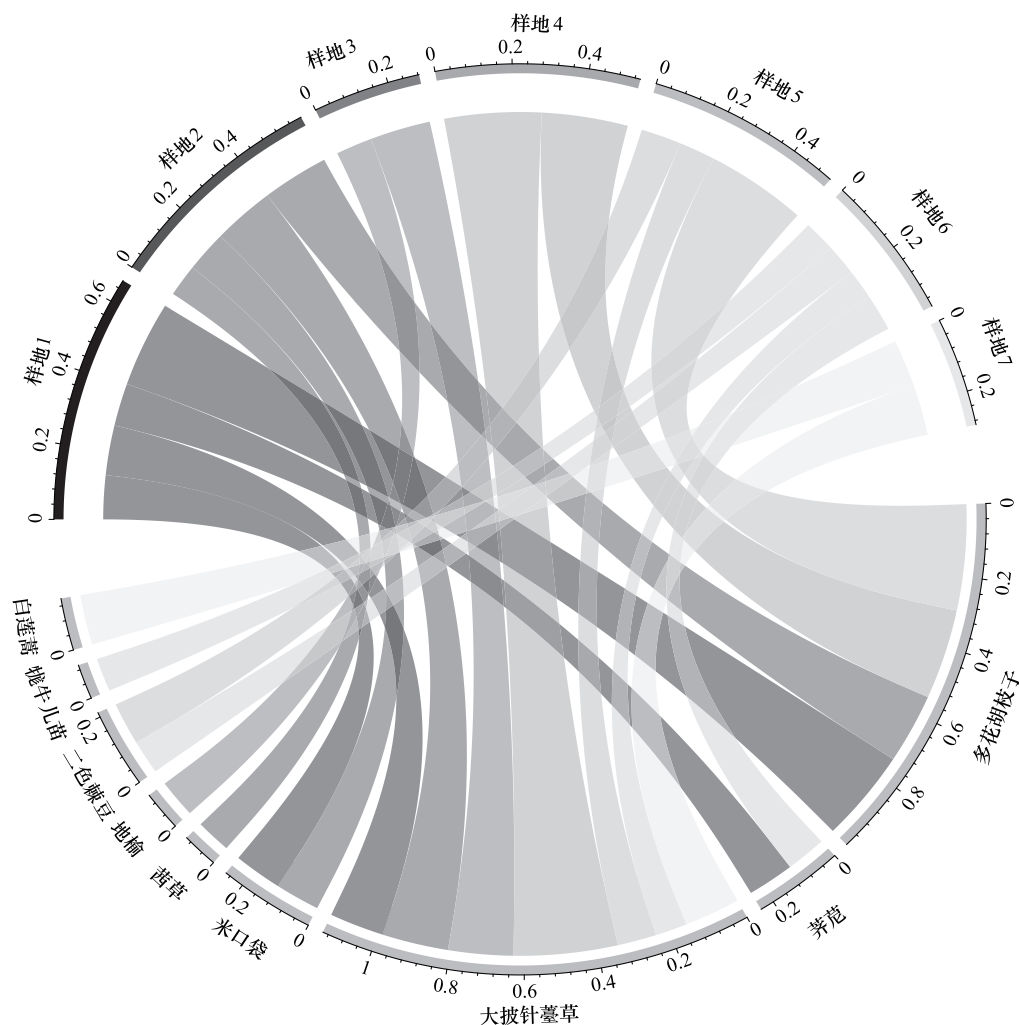


图3 样地-优势种关系

Fig.3 Relationship between Simple plots and dominant species

大披针藁草, *Carex lanceolata*; 多花胡枝子, *Lespedeza floribunda*; 芥苳, *Adenophora tracheloides*; 米口袋, *Gueldenstaedtia verna*; 二色棘豆, *Oxytropis bicolor*; 地榆, *Sanguisorba officinalis*; 白莲蒿, *Artemisia stechmanniana*; 牻牛儿苗, *Erodium stephanianum*; 茜草, *Rubia cordifolia*

单优种群落, 伴生种主要有大披针藁草、华北前胡、野艾蒿等。

VII. 大披针藁草+狗娃花+野艾蒿群丛

包括 61、62 这 2 个样方, 主要分布于样地 7 的坡下, 该群丛平均盖度约 20%, 均高 0.25 m。优势种为大披针藁草、狗娃花、野艾蒿, 伴生种主要有多花胡枝子、委陵菜 (*Potentilla chinensis*)、香青 (*Anaphalis sinica*) 等。

3.2.2 DCA 排序

采用 DCA 对研究区内 7 个样地的 63 个样方进行排序 (图 5), 前 4 个排序轴的特征值分别是 0.4167、0.3665、0.2869、0.2485。DCA 排序的第一、二轴特征值较大, 能较准确反映出植物群落相互之间及其与环境因子之间的关系。群落类型在 DCA 二维排序图上的分布一定程度上反映了群落所处空间的变化及其相互关系。从排序轴看, 第一轴基本反映了群落类型随样地的变化, 从左到右, 群落所在样地在逐渐变化, 最左边是分布在样地 1 和样地 4 中的多花胡枝子+大披针藁草+米口袋群丛, 最右边则是分布在样地 7 中的白莲蒿群丛。第二轴基本反映了坡位的变化, 即沿第二轴从下往上, 坡位由坡下到坡上变化, 植物群落也相应的改变。从排序图可以看出, 样地的 DCA 二维排序图反映的植物群落结构与生境的空间位置关系, 样地 3 和样地 5 的样方分布较集中, 可见这两个样地的植物群落总体上相似性较大, 群落类型较少。样地 2 与样地 5 的样方分

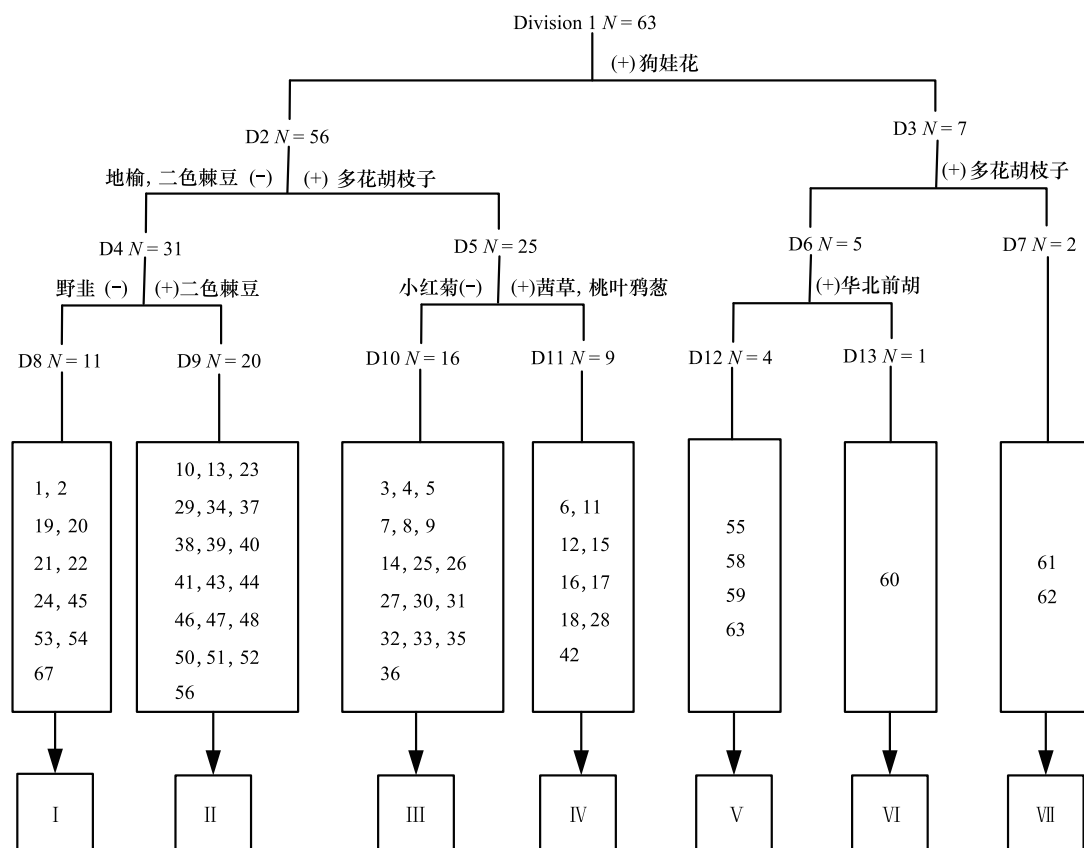


图4 TWINSpan 分类树状图

Fig.4 Dendrogram of the TWINSpan classification

狗娃花, *Aster hispidus*; 野韭, *Allium ramosum*; 小红菊, *Chrysanthemum chanetii*; 茜草, *Rubia cordifolia*; 桃叶鸦葱, *Scorzonera sinensis*; 华北前胡, *Peucedanum harry-smithii*; TWINSpan, 双向指示种分析 Two-Way Indicator Species Analysis; D, 分枝 Division; N, 数量 Number; 1—9, 样地 1; 10—18, 样地 2; 19—27, 样地 3; 28—36, 样地 4; 37—45, 样地 5; 46—54, 样地 6; 55—63, 样地 7

布较分散,可见这两个样地的群落类型较为多样,群落间差别较大。样地 1、样地 2、样地 4 和样地 5 的各个样方重合较大,表现出这些样地间的植物群落较相似,差别较小。总之,除样地 7 外,其余各样地的样方混合排布,可见火烧迹地恢复初期的植物群落大致可分为两大类,即样地 7 的植物群落和其它样地的植物群落。DCA 排序结果与 TWINSpan 的分类结果相匹配,可反映出火烧迹地恢复初期的植物群落结构较为单一。

3.3 群落相似性

为了解火烧迹地恢复初期植物群落的相似性,对所调查的各个样地进行群落相似性分析,计算了 Jaccard 相似性系数(表 3)。由表 3 可以看出,各样地间的 Jaccard 群落相似性系数最高达 0.39,最低为 0.19,样地 1 与其余各样地极不相似。对照表 1,可发现分布在极不相似水平和轻度相似水平的相似性系数约各占 50%。可见,火烧迹地恢复初期各个样地群落间整体的相似性系数均比较低。

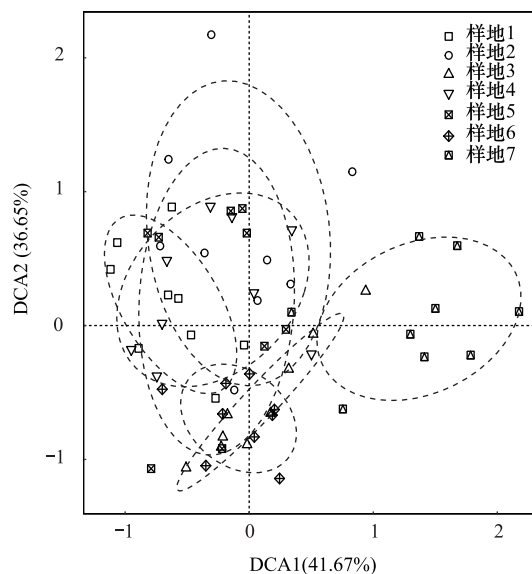


图5 火烧迹地各样方 DCA 二维排序

Fig.5 Two-dimensional DCA ordination diagram of quadrats in burned areas

DCA, 除趋势对应分析 Detrended Correspondence Analysis

表 3 不同样地植物相似性系数

Table 3 Similarity coefficients of community among the plots

	样地 1 Plot 1	样地 2 Plot 2	样地 3 Plot 3	样地 4 Plot 4	样地 5 Plot 5	样地 6 Plot 6	样地 7 Plot 7
样地 1 Plot 1	1.00						
样地 2 Plot 2	0.22	1.00					
样地 3 Plot 3	0.19	0.31	1.00				
样地 4 Plot 4	0.22	0.26	0.29	1.00			
样地 5 Plot 5	0.24	0.27	0.19	0.32	1.00		
样地 6 Plot 6	0.20	0.32	0.39	0.30	0.22	1.00	
样地 7 Plot 7	0.20	0.28	0.35	0.25	0.21	0.39	1.00

3.4 物种多样性

3.4.1 样方数量-物种丰度累积曲线

研究发现,在每个样地中随着样方数量的增加,植物物种数量在逐渐增加(图 6)。各个样地所维持的物种数量均较小且存在差别,样地 7 的物种最丰富,样地 5 的植物种类最少,样地 3 和样地 6 的物种丰富度与变化趋势基本一致。可见在恢复初期,研究区内的植物物种丰富度还处在较低的水平。

3.4.2 多样性指数

对研究区各个样地的 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、物种丰富度和样方盖度进行分析,结果见图 7。样地 1、样地 3、样地 6 和样地 7 的 Shannon-Wiener 指数相对较高,其余 3 个样地则相对较低,而且样地 7 的 Shannon-Wiener 指数均值最大;各个样地的 Pielou 均匀度指数总体上均较大,但存在差异。其中样地 1、样地 4、样地 5 和样地 6 相对较高,样地 2 和样地 7

的次之,样地 3 的均匀度指数平均值最小且显著低于除样地 2 外的其余各样地;各个样地的物种丰富度存在差异,样地 7 的物种丰富度相对较高,样地 1、样地 3 和样地 6 次之,其余 3 个样地相对较低,且样地 5 的物种丰富度均值最小;各个样地的植物群落盖度总体上均较小,其中样地 7 的群落盖度均值最大且显著高于除样地 6 之外的其余各样地,样地 1 的群落盖度均值最小且显著低于除样地 5 外的其余各样地。综上可知,样地 6 和样地 7 植物群落各项指标均相对较高,可见这两个样地的植物群落恢复效果相对较好。

3.5 群落稳定性

从图 8 可知,各个样地的累积相对频度-种类累积百分率曲线与直线的交点距离稳定点(20,80)都较远,稳定性大小排序为样地 1>样地 2>样地 4>样地 6>样地 3>样地 7>样地 5,可见样地 1 的植物群落稳定性相对最高,样地 5 的稳定性最低。说明几个样地的群落均处在不稳定阶段,进而说明整个火烧迹地恢复初期植物群落处于不稳定的演替阶段。

4 讨论

群落的结构特征是研究生态系统的动态变化规律及其生态功能形成与维持机制的基础。群落物种组成对群落动态变化规律、群落功能群划分以及植被恢复策略等方面的研究具有重要作用^[29];TWINSpan 数量分类与 DCA 排序则可以客观地反映各植物群落间的相互关系;而群落相似性是群落结构分析的一个重要基础

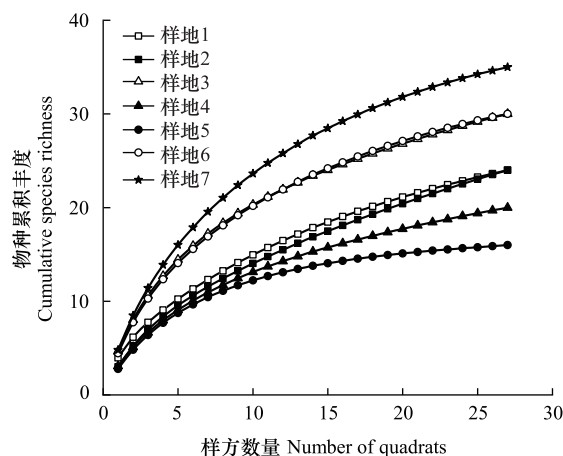


图 6 样方数量-物种累积丰度关系

Fig. 6 Relationship between species cumulative richness and quadrats quantities

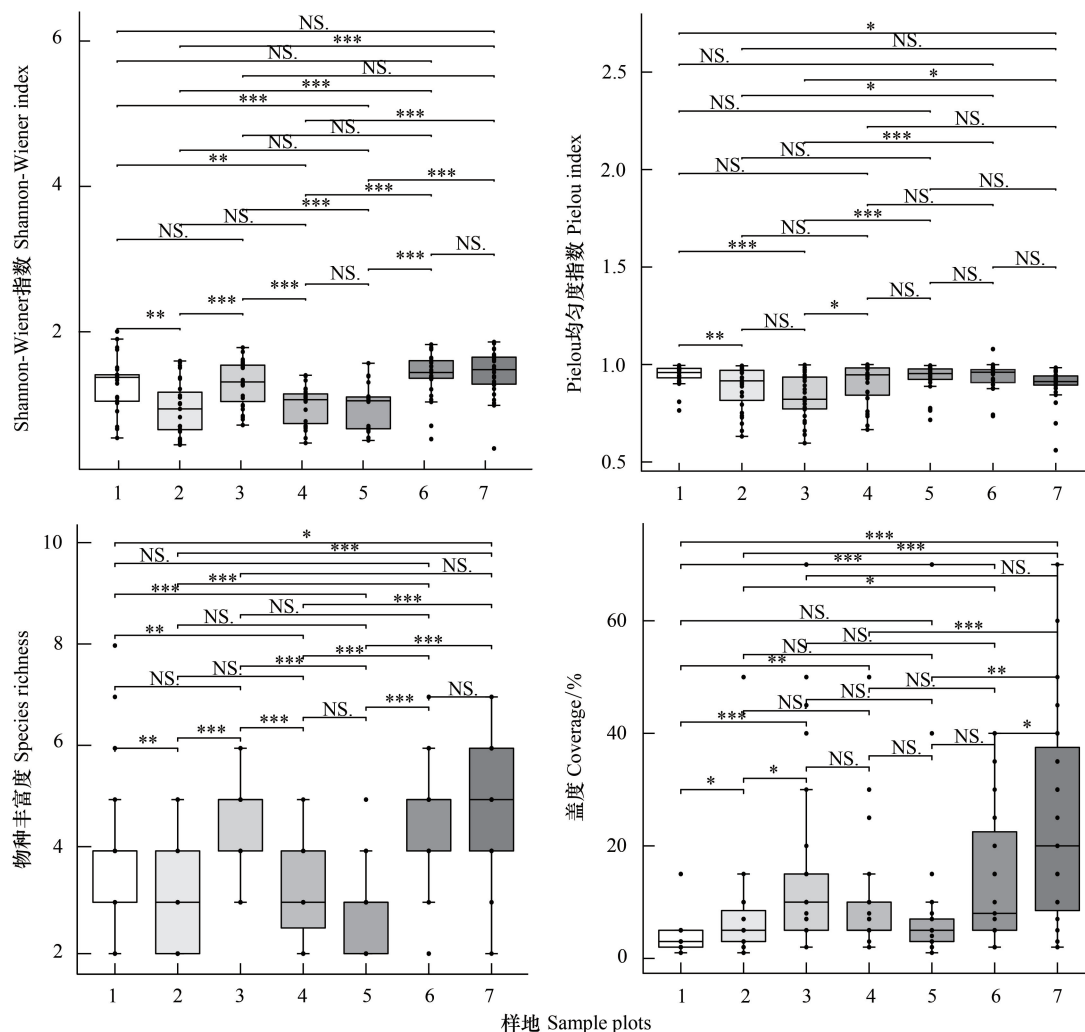


图7 不同样地植物群落多样性指数

Fig.7 Plant community diversity index in different sample plots

“NS.”表示 $P > 0.05$; “*”表示 $P < 0.05$; “**”表示 $P < 0.01$; “***”表示 $P < 0.001$

内容;同时群落多样性则可直观地反映出群落结构的变化;植物群落的稳定性一定程度上反映出各个种群间关联性,各种群间的变化关系又表现了植物群落的稳定程度,通过深入研究群落稳定性,可为植被保护与修复提供理论依据。所以本研究采用以上这些指标来进行探究火烧迹地恢复初期植物群落的结构及其维持机制。

4.1 群落物种组成特征

对太岳山油松林火烧迹地恢复初期的植物群落物种组成研究表明,研究区内菊科、豆科和蔷薇科 3 个科植物占绝对优势,另外 40 个科为少种和单种科,可见火烧迹地恢复初期植物一方面向大科集中,另一方面向少种科和单种科分散,与陈小雪等^[30]的研究结果一致,这可能是由于火烧干扰形成多样化的生境为更多植物的生长提供了条件。童笑笑^[31]对受水淹干扰的三峡水库消落带植物群落的研究也得出了类似的结果,可见这一现象可能是干扰条件下植物演替和适应的一种方向和方式;研究区内以多年生草本植物为主,其中又以地面芽植物所占比例最大;各个样地优势种不尽相同,但均为多年生植物,且均以大披针藁草和多花胡枝子为绝对优势种。李安定等^[32]研究发现火烧迹地在自然恢复过程中,除种子萌发恢复外,其最主要方式取决于芽库数量。本研究无论从生活型组成还是从优势种组成均可看出,火烧迹地恢复初期以多年生植物为主,这些植物的地下繁殖体部分受火烧影响较小,在生长季仍然能够萌发生长,而一年生的先锋植物尚未大量入侵并

定植,这可能是由于研究区周围都是油松林,一年生先锋植物种源较少,其次油松林的存在也可能在一定程度上阻碍了一年生植物种子的传播。

4.2 群落 TWINSpan 数量分类与 DCA 排序

已有研究发现火烧迹地恢复初期草本层植物恢复较快^[26,33],本研究用 TWINSpan 分类法将火烧迹地恢复初期草本层植物群落分为 7 种群落类型。大披针藎草出现在其中 6 个群落当中,也可以显示出火烧迹地恢复初期植物群落优势种较为单一,各样地间有相似的植物群落类型。样地 7 的群落类型和其余 6 个样地差异相对较大,单独包含“V、VI、VII”3 个群落类型。DCA 排序的第一轴和第二轴分别基本反映了群落类型随样地与坡位的变化,其结果和 TWINSpan 分类结果相互印证。不同学者对 DCA 排序轴的生态解释有不同的看法,可见 DCA 排序轴的生态解释会因为研究地点、研究对象或研究尺度的不同而存在差异^[34]。TWINSpan 分类和 DCA 排序结果都表明火烧迹地恢复初期各样地植物群落较为相似,优势种较为单一,这一结果可能同样是由于原生植物群落结构所决定的,因为只经过一个生长季的恢复,大部分物种还未来得及侵入,仅保留了一部分未被火烧淘汰的原有多年生植物。而样地 7 与其它样地的植物群落存在差别,这可能与样地 7 的油松林较稀疏,受火烧强度较小,很多原生植物的繁殖体未被烧死等因素有关。

4.3 群落相似性

群落相似性是指群落间或样地间植物种类组成的相似程度,常用 Jaccard 相似性系数来表示^[35]。总体而言,研究区各样地之间的 Jaccard 相似性系数比较低,在 0.19—0.39 之间。这可能因为各样地之间油松林下的原生植物群落在物种组成、群落盖度等方面不相同,加之火烧淘汰了部分以种子繁殖和扎根较浅的物种,进而影响了各样地之间的群落相似性。样地 1 与其余样地之间均表现为极不相似,这可能由于样地 1 的坡度陡、土层薄且砂石较多、林下原生植被较少等原因所导致。另外,群落相似性和样地间的距离也有一定的关系,距离近的样地间相似性系数较大,例如样地 6 和样地 7。坡向、坡度、土壤等生境因子也会影响样地间的群落相似性,例如样地 3 和样地 6 虽然相隔较远,但因其生境相似,群落相似性系数也较大。群落相似性指数计算结果与 TWINSpan 数量分类和 DCA 排序结果存在一定差异,这是因为 TWINSpan 数量分类和 DCA 排序所用数据为在样方中出现频率 $\geq 95\%$ 的物种。但这也说明了研究区植物群落的优势种群相似性较高,但由于各个样地都有不同少见种和偶见种的存在,导致群落物种的整体相似性较低。

4.4 群落多样性

植物群落多样性可能会受到温度、水分、地形、土壤和干扰等诸多因素的影响。研究区 7 个样地在坡度、坡向、土壤和微地貌等方面都存在差异,可以说每个样地的微生境均不同。已有相关研究表明,生境异质性对植物群落多样性维持具有积极的作用^[36]。如图 7,群落 Shannon-Wiener 多样性指数和丰富度指数均大致可分为两部分,即样地 1、样地 3、样地 6 和样地 7 的 Shannon-Wiener 多样性指数较大,而其余 3 个样地则相对较小,这可能与各样地原生植被及样地间的生境条件密切相关。在调查时也观察到该 4 个样地中植物种类相对较多且植物长势较好,同时与样地 1 相比,其余 3 个样地的生境条件较为优越,预测在今后演替过程中样地 1 的植物群落恢复会相对较慢;各个样地的 Pielou 均匀度指数均比较高,说明火烧迹地恢复初期样地中各群落间的植物种类较为相似,这可能和各样地原生植物种质资源有很大关系,同时各群落中植物的丰富度与生长状况相近,所以均匀度较高;样地 7 的群落盖度显著高于其他样地,可能因为样地 7 原生油松林密度较低,林

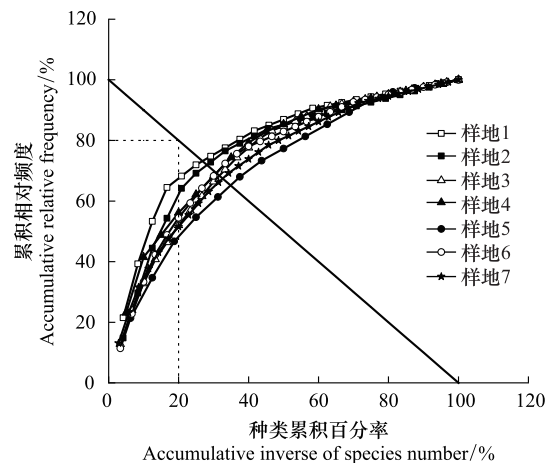


图 8 各样地植物群落稳定性

Fig.8 The stability of plant community in sample plots

下植物群落盖度较大,加之一定的放牧干扰,在恢复初期各群落盖度就相对较大。总之,各个样地的群落多样性指数不尽相同,样地 6 和样地 7 植物群落各项指标均相对较高,但是演替初期的植物群落十分脆弱,高水平的物种多样性也并不能说明群落具备了稳定性^[37],只能说明这 2 个样地的植物群落恢复相对较快,这可能和各个样地的火烧强度不同有很大关系。总体而言,火烧迹地恢复初期草本层植物群落除 Pielou 均匀度指数外,各个多样性指数均较低,这与邓贤兰等^[38]的研究结果一致。

4.5 群落稳定性

已有研究表明种间竞争、生境条件和人为干扰等因素均会影响植物群落稳定性^[39]。本研究采用 Godron 稳定性分析方法,发现各个样地群落稳定比值远离(20,80),可见火烧迹地恢复初期植物群落各物种间尚未形成稳定共存的组合及适宜的种间关系,群落的结构还不稳定,物种组成及其数量结构处于动态变化中。曹慧等^[24]研究也发现油松林火烧后物种多样性和群落的稳定性均长时间处于较低的状态。这可能是因为研究区油松林的群落结构简单,成层性较差,种源缺乏,恢复速度相对较慢。本研究还发现各个样地间群落稳定性存在差异,说明不同样地间微生境的不同是影响火烧迹地植物群落稳定程度的因素之一。不同样地的光照、坡度、土壤等生境条件以及人为干扰程度不同,导致各样地群落稳定性系数不同。样地 1 植物群落的稳定性系数最大,但其植物种类与多样性却较低,这可能是因为样地 1 的坡度较大,微地貌较为单一,植物群落类型也较少。样地 5 的植物群落稳定性系数最小,可能是因为样地 5 内存在沟谷、平地、坡地以及虎榛子灌丛等多种微生境,导致群落类型较为多样,物种间关系较复杂,群落稳定性较低。

4.6 对植被修复的建议

太岳山区纯林较多,林分结构简单,易燃树种比例大、分布广,特别是油松林分布广泛,而且林下松针累积较厚,很容易发生森林火灾^[24]。在野外调查过程中观察到一些植物,如虎榛子、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)和黄刺玫等灌木以及蒙古栎只是地上部分被烧毁,又从茎干基部萌发出了新枝。预测在接下来几年的演替过程当中,研究区的植物群落会从多年生草本植物群落到灌木和草本植物群落逐渐到蒙古栎群落演替。虽然蒙古栎和油松均为太岳山区现有森林群落的主要树种,但实际上该地区属于黄土丘陵区,水分条件和土壤条件均比较差,并不适宜种植高大乔木,加之乔木的生长周期较长,建议在该地区火烧迹地修复过程中不宜只飞播油松种子,而是要因地制宜,科学地进行植物配置。根据火烧迹地的火烧强度、地形地势、土壤和光照等条件,选择合适的物种搭配,以提高更新速度并减少成本。建议在坡度较陡、土层较薄的阳坡,主要栽植胡枝子、沙棘和黄刺玫等耐旱灌木以及大披针藁草等耐旱草本,在坡度较缓的阳坡可栽种蒙古栎,同时可以在阴坡合理种植油松和虎榛子,这样可以加快植被恢复进程,又可减少火烧迹地水土流失,并兼顾植物多样性保育。

参考文献(References):

- [1] 李晓伟, 赵刚, 于秀波, 于强. 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型. 生态学报, 2013, 33(4): 1219-1229.
- [2] 朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1703-1710.
- [3] 乔泽宇, 房磊, 张悦楠, 杨健, 江涛, 袁昊. 2001-2017 年我国森林火灾时空分布特征. 应用生态学报, 2020, 31(1): 55-64.
- [4] 王伯荪. 植物群落学. 北京: 高等教育出版社, 1987: 69-78.
- [5] 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 周金星, 蔡春菊, 王昭艳. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1697-1702.
- [6] Maffei C, Menenti M. Predicting forest fires burned area and rate of spread from pre-fire multispectral satellite measurements. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 158: 263-278.
- [7] Lee B, Park P S, Chung J. Temporal and spatial characteristics of forest fires in South Korea between 1970 and 2003. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(3): 389-396.
- [8] Edwards A C, Maier S W, Hutley L B, Williams R J, Russell-Smith J. Spectral analysis of fire severity in north Australian tropical savannas. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 56-65.
- [9] 陈宝, 刘志华, 房磊. 基于多端元光谱混合分析方法的大兴安岭火后植被盖度恢复研究. 生态学报, 2018, 39(22): 8630-8638.

- [10] 王严, 胡卸文, 杨瀛, 于振江, 曹希超. 火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 40-45.
- [11] 梁东哲, 赵雨森, 曹杰, 辛颖. 不同恢复方式下大兴安岭重度火烧迹地林地土壤温室气体通量. 生态学报, 2019, 39(21): 7950-7959.
- [12] 杨大星, 杨茂发, 徐进, 尚小丽. 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性. 生态学报, 2013, 33(8): 2531-2544.
- [13] 刘俊第, 林威, 王玉哲, 姜婧, 方熊, 易志刚. 火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响. 生态学报, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [14] 芮淑君, 牛树奎, 陈锋, 褚燕琴. 冀北辽河源自然保护区油松林火烧迹地土壤化学性质研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 582-586.
- [15] 陈韵如, 杨扬, 张喜亭, 杨艳波, 王慧梅, 王文杰. 大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性的影响. 生态学报, 2019, 39(21): 7977-7986.
- [16] 胡宗达, 刘世荣, 胡璟, 刘兴良, 余昊, 李登峰, 何飞. 川西亚高山川滇高山栎林火烧迹地土壤呼吸特征及其影响因素. 林业科学, 2018, 54(2): 18-29.
- [17] 胡同欣, 胡海清, 孙龙. 中度火干扰对兴安落叶松林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(8): 2915-2924.
- [18] 李攀, 周梅, 王忠林, 魏江生, 赵鹏武, 温都如娜, 白巧云. 寒温带兴安落叶松林火烧迹地地表 CO₂ 通量研究. 生态环境学报, 2012, 21(12): 1950-1954.
- [19] Nowak S, Kershaw G P, Kershaw L J. Plant diversity and cover after wildfire on anthropogenically disturbed and undisturbed sites in subarctic upland *Picea mariana* forest. Arctic, 2002, 55(3): 269-280.
- [20] Collins S L. Fire frequency and community heterogeneity in tallgrass prairie vegetation. Ecology, 1992, 73(6): 2001-2006.
- [21] Bakhtar A J, Haidari M, Sagheb-Talebi K, Mohajer M R M. The impact of fire on the plants diversity in Iranian Oak forest. Global Journal of Biodiversity Science and Management, 2013, 3(2): 249-255.
- [22] 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 王森, 孙家宝. 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例. 生态学报, 2013, 33(17): 5201-5209.
- [23] 蓝俊杰. 漠河地区落叶松火烧迹地群落物种组成及多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [24] 曹慧. 火烧对油松天然林林下植被及土壤的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.
- [25] 张文, 张建利, 周玉锋, 安明志, 吴佳海, 杨瑞. 喀斯特山地草地植物群落结构与相似性特征. 生态环境学报, 2011, 20(5): 843-848.
- [26] 王绪高, 李秀珍, 贺红土, 冷文芳, 问青春. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究. 生态学杂志, 2004, 23(5): 35-41.
- [27] Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal. Statistical Ecology, 1972, 3: 397-415.
- [28] Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, Jonsson M, Gustafsson L, Kjellander P, Ruiz-Jaen M C, Fröberg M, Stendahl J, Philipson C D, Mikusiński G, Andersson E, Westerlund B, Andrén H, Moberg F, Moen J, Bengtsson J. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. Nature Communications, 2013, 4: 1340. <https://doi.org/10.1038/ncomms2328>.
- [29] 陈金磊, 方晰, 辜翔, 李雷达, 刘兆丹, 王留芳, 张仕吉. 中亚热带 2 种森林群落组成、结构及区系特征. 林业科学, 2019, 55(2): 159-172.
- [30] 陈小雪, 李红丽, 董智, 王强, 陈鹏, 李锡杰. 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. 西北植物学报, 2020, 40(1): 130-140.
- [31] 童笑笑. 三峡库区澎溪河消落带植物群落空间格局及生境影响分析[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2017.
- [32] 李安定, 彭熙, 张建利. 喀斯特山区森林火灾后火烧迹地植物更新库研究. 贵州科学, 2014, 32(1): 40-46, 57-57.
- [33] 包月梅. 根河市火烧迹地灌木和草本生物量动态变化分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [34] 姚帅臣, 王景升, 丁陆彬, 包小婷, 李超, 王彤, 刘文婧, 李妍妍. 拉萨河谷草地群落的数量分类与排序. 生态学报, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [35] 于顺利, 陈灵芝, 张承军. 不同地点蒙古栎群落相似性的研究. 植物学通报, 2000, 17(6): 554-558.
- [36] 武帅楷, 袁兴中, 刘红, 陈鸿飞, 王可洪. 川东北乡村不同生境中杂草多样性研究: 以蚕华山村为例. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1420-1427.
- [37] Fowler M S. Increasing community size and connectance can increase stability in competitive communities. Journal of Theoretical Biology, 2009, 258(2): 179-188.
- [38] 邓贤兰, 张文尧, 贺俐, 龙婉婉. 火烧迹地萌芽更新林杉木种群结构与林下植物多样性研究. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 90-94.
- [39] 叶权平, 张文辉, 于世川, 薛文艳. 桥山林区麻栎群落主要乔木种群的种间联结性. 生态学报, 2018, 38(9): 3165-3174.