

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210044

# 太行山南段油松林火烧迹地优势 草本生态位及种间关系

金山 武帅楷

(长治学院生物科学与技术系, 太行山生态与环境研究所, 山西 长治 046011)

**摘要:**【目的】生态位及种间关系是研究群落结构的主要方法, 为研究太行山南段油松林火烧迹地不同恢复期草本植物群落的结构特征, 探索其动态变化规律。【方法】本文以恢复 13 年(S1)、7 年(S2)、6 年(S3)和 1 年(S4)的 4 个火烧迹地草本植物优势种为研究对象, 着重研究不同恢复阶段优势种的生态位和种间关联特征, 计测其生态位宽度、生态位重叠值, 同时通过总体相关性检验、 $\chi^2$  检验和 Spearman 秩相关性检验研究其种间关系, 并划分生态种组。【结果】大披针藁草、小红菊和白莲蒿在各个恢复期的优势度、生态位宽度与生态位重叠值均较大。总体相关性检验表明, S1 为显著正关联, S2 和 S4 为显著负关联, S3 为不显著正关联。 $\chi^2$  检验表明, S1、S2、S3 和 S4 的正负关联比分别为 2.33、0.69、0.84 和 0.63。Spearman 秩相关性检验表明, S1 的正关联种对数大于负关联种对数, 而 S2、S3 和 S4 的正关联种对数小于负关联种对数。生态种组划分表明 S1、S2、S3 的优势种基本可以划分为以大披针藁草 + 小红菊、白莲蒿以及其他优势种为代表的 3 个生态种组, S4 的 10 个优势种所划分的 3 个生态种组则主要以大披针藁草、小红菊和白莲蒿为代表。【结论】生态位与种间关系研究表明, 太行山南段火烧迹地草本植物群落在恢复 13 年时稳定性最大, 有助于更好地理解火烧迹地物种间的相互作用、共存、分布等相关机制, 同时可为火烧迹地规划管理与植被恢复过程中植物配置提供理论支撑。

**关键词:** 生态位宽度; 生态位重叠;  $\chi^2$  检验; Spearman 检验; 生态种组

**中图分类号:** S718.5; S762.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)04-0035-12

**引文格式:** 金山, 武帅楷. 太行山南段油松林火烧迹地优势草本生态位及种间关系 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 35-46. Jin Shan, Wu Shuaikai. Niche and interspecific association of dominant species in herb layer of burned *Pinus tabuliformis* forest in the southern Taihang Mountain of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 35-46.

## Niche and interspecific association of dominant species in herb layer of burned *Pinus tabuliformis* forest in the southern Taihang Mountain of northern China

Jin Shan Wu Shuaikai

(Faculty of Biological Science and Technology, Changzhi University, Ecological and Environmental  
Research Institute of Taihang Mountain, Changzhi 046011, Shanxi, China)

**Abstract:** [Objective] Niche and interspecific association are the basis and main method to study community structure. The purpose of this paper was to study the structural characteristics and dynamic changes in herb layer of burned *Pinus tabuliformis* forest in the southern Taihang Mountains at different restoration stages. [Method] We focus on the niche characteristics and interspecific associations of the dominant species of herb layer plants in four burned areas of 13 years (S1), 7 years (S2), 6 years (S3) and 1 year (S4), then we calculated the niche width and niche overlap, and studied the interspecific association

收稿日期: 2021-02-05 修回日期: 2021-03-18

基金项目: 山西省 1331 重点学科建设项目(1331KSC), 山西省重点学科建设项目(FSKSC), 长治学院校级项目(XJ2020002401)。

第一作者: 金山, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林生态学。Email: jinshan0355@163.com 地址: 046011 山西省长治市保宁门东街 73 号长治学院生物科学与技术系。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

through the overall association test,  $\chi^2$  test and Spearman rank correlation test. Then the ecological species groups were divided. [Result] The dominance, niche width, and niche overlap of dominant species *Carex lanceolata*, *Chrysanthemum chanetii* and *Artemisia stechmanniana* were larger in different restoration periods. The overall association test showed that S1 was a significantly positive association, S2 and S4 were a significantly negative association, and S3 was an insignificantly positive association.  $\chi^2$  test showed that the positive and negative association ratios of S1, S2, S3 and S4 were 2.33, 0.69, 0.84 and 0.63. Spearman rank correlation test showed that the number of positive association pairs in S1 was greater than that of negative association pairs, while the number of positive association pairs in S2, S3 and S4 was less than the number of negative association pairs. The dominant species in S1, S2 and S3 can be divided into three ecological species groups represented by *Carex lanceolata* + *Chrysanthemum chanetii*, *Artemisia stechmanniana* and other dominant species. And 10 dominant species in S4 can be divided into three ecological species groups represented by *Carex lanceolata*, *Chrysanthemum chanetii* and *Artemisia stechmanniana*. [Conclusion] Herb plant community in the burned area of southern Taihang Mountain has the greatest stability after 13 years of recovery. The niche and interspecific association may illuminate the interaction mechanisms such as species coexistence, distribution, structure changes in burned area, which could provide theoretical support in burned area management and plant distribution.

**Key words:** niche width; niche overlap;  $\chi^2$  test; Spearman rank correlation test; ecological species group

优势种生态位及种间关联理论及其应用是世界各国的研究热点<sup>[1]</sup>,二者不仅反映物种与环境之间的相互作用,也可表征群落的稳定性<sup>[2]</sup>,更是群落动态变化的动力之一<sup>[3-4]</sup>。生态位理论已广泛应用于种间竞争与共生、群落演替、生物多样性维持机制以及资源保护与利用等领域<sup>[5]</sup>。优势种生态位的测度可通过计算其生态位宽度、生态位重叠、种间关联和生态种组等参数来实现<sup>[6]</sup>。生态位宽度和生态位重叠反映了种群对资源的利用能力<sup>[7]</sup>。种间关联可分为正关联、负关联和无关联3类<sup>[8]</sup>,其显著性则可反映群落生境及优势种生态位重叠与分离的差异<sup>[9]</sup>。种间关联既可为种间关系研究提供依据,也有利于正确认识物种多样性保护<sup>[10]</sup>。生态种组反映出生态系统中某些种因具有相似的外部形态和生态习性,进而组合到一起<sup>[11]</sup>。目前,对植物生态位的研究主要集中在生态位与生境关系,种间共存机制<sup>[12]</sup>,不同资源条件下物种生态位的差异与适应策略<sup>[13]</sup>,生态位宽度和生态位重叠测度<sup>[14]</sup>等方面。然而,现有的研究大多集中在某一个群落中的植物,没有明确量化上述生态位参数在群落不同演替阶段的变化,同时对群落动态变化过程中每个变化阶段优势种间关联的研究也较少<sup>[15]</sup>。

森林火灾对森林生态系统有很大的影响,而对林火干扰的研究,集中在火烧迹地环境因子和生物群落特征等方面<sup>[16]</sup>,其中火烧迹地植物群落的研究则集中在林火对植物多样性、生物量和群落动态变化的影响。国内外对植物生态位的研究比较广泛和

成熟,但对火烧迹地不同恢复期植物群落优势种生态位研究还鲜见报道<sup>[17]</sup>。为研究太行山南段油松(*Pinus tabulaeformis*)林火烧迹地不同恢复期草本层优势种的生态位及种间关系的动态变化,本文将恢复时间作为生态位研究的梯度,以空间代替时间的方法,选择太行山南段4个油松林火烧迹地样地,调查了540个小样格中的草本植物。通过计测各样地草本层优势种的生态位宽度、重叠值、相似性比例,并划分生态种组,进而深入研究火烧迹地不同恢复期植物群落类型、结构。研究结果能更加全面反映太行山南段油松林火烧迹地不同恢复期草本层物种组成、功能及动态变化特征,为火烧迹地自然植被恢复和森林可持续管理提供一定理论依据。

## 1 研究区概况

太行山脉呈东北—西南走向,横跨河北省西部、山西省东部和河南省北部,通常按纬度位置将其分为北段、中段和南段三部分。太行山南段位于35°10′~37°08′N、112°26′~113°35′E之间,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温5~11℃,无霜期约130d,年平均降水量约600mm。土壤类型主要为山地褐土,含石量高<sup>[18]</sup>。主要植被类型包括:针叶林(油松林为主)、落叶阔叶林和落叶灌丛。太行山南段油松林居多,冬、春季气候干燥,易发生森林火灾。本研究选择4个不同恢复期的油松林火烧迹地样地(表1)。

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

样地 Sample plot	经纬度 Latitude and longitude	平均海拔 Mean altitude/m	火灾日期 Fire date	恢复时间/a Recovery time/year
S1	113°11'27"~113°12'34"E, 36°12'24"~36°13'05"N	1 300	2007-05	13
S2	113°25'13"~113°26'47"E, 35°46'59"~35°47'23"N	1 400	2013-03	7
S3	113°25'39"~113°26'09"E, 35°59'22"~35°59'55"N	1 400	2014-02	6
S4	112°12'44"~112°21'59"E, 36°44'00"~36°51'13"N	1 500	2019-03	1

注: S1为长治市老顶山; S2为陵川县棋子山; S3为壶关县石坡乡; S4为沁源县王陶乡。Notes: S1, Laoding Mountain, Changzhi City; S2, Qizi Mountain, Lingchuan County; S3, Shipo Township, Huguang County; S4, Wangtao Township, Qinyuan County.

## 2 研究方法

### 2.1 野外调查

2019年9月,选择4个油松林火烧迹地样地进行调查。在每个样地按照等距取样法设置5个100 m × 100 m的样方,每个样方内划分坡上、坡中、坡下3个坡位,每个坡位设置3个5 m × 5 m的样格,然后在每个5 m × 5 m的样格中沿对角线设置3个1 m × 1 m的小样格进行草本植物调查,小样格共计540个,记录各小样格内草本植物的多度、高度、盖度等指标,同时记录经纬度、海拔、坡度等环境因子信息。

### 2.2 计算公式

#### 2.2.1 群落优势种

采用Kikvidze-Ohsawa改进的优势种确定方法<sup>[19]</sup>,分别确定4个样地草本层植物群落优势种的数量,计算公式:

$$A = 1 / \sum_{i=1}^S \left( \frac{v_i}{V} \right)^2 \quad (1)$$

式中:  $A$  表示优势种数量;  $S$  表示每个样地中物种总数,  $v_i$  表示物种  $i$  的重要值;  $V$  表示每个样地所有物种的重要值之和。根据物种重要值排序来确定各个样地的优势种。

#### 2.2.2 生态位

采用Levins生态位宽度公式和Levins生态位重叠公式<sup>[20]</sup>,利用R软件计算各样地优势种生态位宽度和生态位重叠值,计算公式:

$$B_i = 1 / \sum_{j=1}^N P_{ij}^2 \quad (2)$$

$$P_{ij} = v_{ij} / V_i \quad (3)$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^N (P_{ij} P_{kj}) / \sum_{j=1}^N P_{ij}^2 \quad (4)$$

$$P_{kj} = v_{kj} / V_k \quad (5)$$

式中:  $B_i$  为生态位宽度,  $N$  为总样方数,  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  分

别是种  $i$  和  $k$  在样方  $j$  中的重要值占其在所有样方中重要值之和的比例,  $v_{ij}$  和  $v_{kj}$  分别为种  $i$  和  $k$  在样方  $j$  中的重要值,  $V_i$  和  $V_k$  分别为种  $i$  和  $k$  在所有样方中的重要值之和,  $O_{ik}$  为生态位重叠值。

#### 2.2.3 种间关系

##### (1) 总体相关性检验

总体相关性的检验方法是计算方差比率值(VR)<sup>[20]</sup>。

$$VR = S_T^2 / \delta_T^2 \quad (6)$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \quad (7)$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \left( 1 - \frac{n_i}{N} \right) \quad (8)$$

$$W = VR \cdot N \quad (9)$$

式中:  $T_j$  为样方  $j$  内出现的物种数目,  $t$  为样方中物种平均数,  $S$  为所有物种总数,  $n_i$  为物种  $i$  出现的样方数目,  $S_T^2$  为样方中物种数的方差,  $\delta_T^2$  为所有物种出现频度的方差。若  $VR = 1$ , 种间整体无关联;  $VR > 1$ , 种间整体呈正关联; 若  $VR < 1$ , 种间总体呈负关联。  $W$  是检验  $VR$  显著性的指数, 当  $W < \chi_{0.95N}^2$  或  $W > \chi_{0.05N}^2$ , 则物种总体关联显著 ( $P < 0.05$ ), 反之, 则不显著 ( $P > 0.05$ )。

##### (2) $\chi^2$ 检验

用Yates的连续性校正公式<sup>[20]</sup>进行 $\chi^2$ 检验。

$$\chi^2 = (|ad - bc| - N/2)^2 N / ((a+b)(c+d)(a+c)(b+d)) \quad (10)$$

式中:  $a$  为2个物种共同出现的样方数,  $b$ 、 $c$  为仅有1个物种出现的样方数,  $d$  为2个物种均未出现的样方数。当  $ad > bc$  时, 种间关联性为正关联; 当  $ad < bc$  时为负关联。就种间关联的显著性而言, 当  $\chi^2 < 3.841$ , 种间关联性不显著 ( $P > 0.05$ ); 当  $3.841 < \chi^2 < 6.635$ , 种间关联性显著 ( $0.01 < P < 0.05$ ); 当  $\chi^2 > 6.635$  时, 种间关联性极显著 ( $P < 0.01$ )。

##### (3) Spearman 秩相关分析

选择Spearman秩相关系数测定优势种间的相关性<sup>[20]</sup>, 利用R软件计算Spearman秩相关系数及

$P$  值, 然后作图。

$$r_s = 1 - 6 \sum d_i^2 / (A(A^2 - 1)) \quad (11)$$

式中:  $r_s$  为 Spearman 秩相关系数,  $A$  为优势种数据数量,  $d_i$  为两个优势种数据次序差值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态位特征

##### 3.1.1 生态位宽度

各样地草本层优势种生态位宽度(表2)表明, 大

披针藁草(*Carex lanceolata*)、小红菊(*Chrysanthemum chaneitii*)和白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)在不同恢复期的生态位宽度均较大。S1 中大披针藁草、小红菊、白莲蒿和兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)的生态位宽度较大, S2 中大披针藁草、小红菊和驴欺口(*Echinops latifolius*)的生态位宽度较大, S3 中大披针藁草、小红菊、白莲蒿、兴安胡枝子和驴欺口的生态位宽度较大, S4 中大披针藁草、兴安胡枝子和少花米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)的生态位宽度较大。

表2 各样地草本层优势种生态位宽度

Tab. 2 Niche width of dominant species in herb layer

样地 Sample plot	Aa	Adp	Ae	Ah	Anv	Ap	As	At	Bi	Cl	Dc	Di
S1	—	—	—	—	—	—	40.08	—	—	106.77	62.93	29.05
S2	13.89	17.73	—	13.76	14.41	—	19.83	—	14.96	78.08	51.91	—
S3	—	—	—	—	—	19.77	46.14	—	—	94.67	54.30	—
S4	—	—	13.44	—	—	—	13.20	21.28	—	63.86	8.73	—

样地 Sample plot	Ec	El	Gv	Ld	Ob	Pc	Rc	Scs	Sj	So	Ss	Vd
S1	—	—	—	42.64	—	—	—	—	—	—	—	—
S2	11.25	32.98	—	—	—	17.91	—	—	—	—	15.80	—
S3	—	34.47	—	38.51	—	—	15.71	—	23.98	31.45	—	—
S4	—	—	34.87	53.57	13.07	—	—	18.73	—	—	—	7.26

注: Aa为三脉紫菀; Adp为石沙参; Ae为南牡蒿; Ah为铃铃香青; Anv为野棉花; Ap为京芒草; As为白莲蒿; At为芥苳; Bi为白羊草; Cl为大披针藁草; Dc为小红菊; Di为野菊; Ec为香薷; El为驴欺口; Gv为少花米口袋; Ld为兴安胡枝子; Ob为地角儿苗; Pc为委陵菜; Rc为茜草; Scs为桃叶鸦葱; Sj为风毛菊; So为地榆; Ss为大油芒; Vd为裂叶堇菜。下同。Notes: Aa, *Aster ageratoides*; Adp, *Adenophora polyantha*; Ae, *Artemisia eriopoda*; Ah, *Anaphalis hancockii*; Anv, *Anemone vitifolia*; Ap, *Achnatherum pekinense*; As, *Artemisia sacrorum*; At, *Adenophora tracheloides*; Bi, *Bothriochloa ischaemum*; Cl, *Carex lanceolata*; Dc, *Dendranthema chaneitii*; Di, *Dendranthema indicum*; Ec, *Elsholtzia ciliate*; El, *Echinops latifolius*; Gv, *Gueldenstaedtia verna*; Ld, *Lespedeza daurica*; Ob, *Oxytropis bicolor*; Pc, *Potentilla chinensis*; Rc, *Rubia cordifolia*; Scs, *Scorzonera sinensis*; Sj, *Saussurea japonica*; So, *Sanguisorba officinalis*; Ss, *Spodiopogon sibiricus*; Vd, *Viola dissecta*. The same below.

##### 3.1.2 生态位重叠值

S1 ~ S4 样地草本层优势植物种间生态位重叠值(表3 ~ 6)大于 0.5 的分别占 40.00%、10.61%、25.00%、4.44%, S1 的草本植物种群间资源共享现象较明显。S1 中生态位重叠值较大的种对有: 大披针藁草-小红菊、大披针藁草-兴安胡枝子、大披针藁草-白莲蒿、大披针藁草-野菊(*Dendranthema*

*indicum*)。S2 中生态位重叠值较大的种对有: 大披针藁草-小红菊、大披针藁-驴欺口、大披针藁草-大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、大披针藁草-铃铃香青(*Anaphalis hancockii*)、大披针藁草-三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、驴欺口-大油芒、驴欺口-野棉花(*Anemone vitifolia*)。S3 中生态位重叠值较大的种对有: 大披针藁草-小红菊、大披针藁草-白莲蒿、大披针藁草-驴欺口、大披针藁草-兴安胡枝子、大披针藁草-地榆(*Sanguisorba officinalis*)、大披针藁草-京芒草(*Achnatherum pekinense*)、大披针藁草-风毛菊(*Saussurea japonica*)、大披针藁草-茜草(*Rubia cordifolia*)、小红菊-地榆。S4 中生态位重叠值较大的种对有: 大披针藁草-少花米口袋、兴安胡枝子-桃叶鸦葱(*Scorzonera sinensis*)。

表3 样地1草本层优势种生态位重叠值

Tab. 3 Niche overlap values of dominant species in herb layer of sample plot 1

S1	Cl	Dc	Ld	As	Di
Cl	0.00				
Dc	0.62	0.00			
Ld	0.63	0.35	0.00		
As	0.53	0.44	0.29	0.00	
Di	0.50	0.40	0.30	0.40	0.00

#### 3.2 种间关联

##### 3.2.1 总体相关性检验

各样地草本层优势种间总体呈关联, S1 和 S3

表 4 样地 2 草本层优势种生态位重叠值

Tab. 4 Niche overlap values of dominant species in herb layer of sample plot 2

S2	Cl	Dc	El	Ss	Bi	As	Pc	Ah	Aa	Ec	Anv	Adp
Cl	0.00											
Dc	0.55	0.00										
El	0.61	0.20	0.00									
Ss	0.60	0.05	0.51	0.00								
Bi	0.41	0.19	0.04	0.00	0.00							
As	0.34	0.24	0.15	0.00	0.03	0.00						
Pc	0.47	0.40	0.06	0.00	0.21	0.10	0.00					
Ah	0.61	0.36	0.09	0.00	0.18	0.00	0.10	0.00				
Aa	0.55	0.26	0.27	0.11	0.10	0.00	0.09	0.15	0.00			
Ec	0.31	0.17	0.41	0.00	0.00	0.15	0.09	0.02	0.02	0.00		
Anv	0.40	0.27	0.59	0.26	0.03	0.03	0.00	0.04	0.25	0.00	0.00	
Adp	0.43	0.35	0.10	0.03	0.04	0.23	0.24	0.01	0.01	0.15	0.04	0.00

表 5 样地 3 草本层优势种生态位重叠值

Tab. 5 Niche overlap values of dominant species in herb layer of sample plot 3

S3	Cl	Dc	As	El	Ld	So	Ap	Sj	Re
Cl	0.00								
Dc	0.51	0.00							
As	0.56	0.26	0.00						
El	0.60	0.47	0.19	0.00					
Ld	0.59	0.40	0.45	0.18	0.00				
So	0.63	0.53	0.11	0.42	0.29	0.00			
Ap	0.91	0.31	0.23	0.11	0.16	0.14	0.00		
Sj	0.61	0.47	0.15	0.40	0.18	0.27	0.08	0.00	
Re	0.55	0.18	0.13	0.06	0.07	0.11	0.16	0.04	0.00

表 6 样地 4 草本层优势种生态位重叠值

Tab. 6 Niche overlap values of dominant species in herb layer of sample plot 4

S4	Cl	Ld	Gv	At	Scs	As	Ob	Ae	Dc	Vd
Cl	0.00									
Ld	0.46	0.00								
Gv	0.51	0.25	0.00							
At	0.32	0.21	0.29	0.00						
Scs	0.22	0.53	0.08	0.27	0.00					
As	0.28	0.06	0.11	0.06	0.09	0.00				
Ob	0.21	0.23	0.10	0.22	0.10	0.04	0.00			
Ae	0.29	0.19	0.12	0.15	0.10	0.00	0.11	0.00		
Dc	0.39	0.13	0.34	0.34	0.06	0.00	0.00	0.13	0.00	
Vd	0.13	0.22	0.22	0.13	0.36	0.00	0.03	0.25	0.04	0.00

的VR > 1, S2 和 S4 的VR < 1。S1、S2 和 S4 的方差检验比例系数W值在区间  $[\chi^2_{(0.95, 135)}, \chi^2_{(0.05, 135)}]$  之外, S3 的方差检验比例系数W值在区间  $[\chi^2_{(0.95, 135)},$

$\chi^2_{(0.05, 135)}]$  之内(表 7)。因此, S1 的草本层优势种间整体呈显著( $P < 0.05$ )正关联, S2 和 S4 的草本层优势种间整体呈显著( $P < 0.05$ )负关联, S3 的草本层优



表7 各样地草本层优势植物种间总体关联性

Tab. 7 General associativity test of dominant plant species in herb layer

样地 Sample plot	$S_T^2$	$\delta_T^2$	VR	$W$	$\chi^2$ 临界值 ( $\chi^2_{(0.95,135)}$ , $\chi^2_{(0.05,135)}$ )	$\chi^2$ clinical value ( $\chi^2_{(0.95,135)}$ , $\chi^2_{(0.05,135)}$ )
S1	1.30	0.93	1.39	188.17		(109.16, 163.12)
S2	1.41	1.89	0.75	100.72		(109.16, 163.12)
S3	2.04	1.77	1.15	155.72		(109.16, 163.12)
S4	0.77	1.47	0.52	70.55		(109.16, 163.12)

物种间整体呈不显著( $P > 0.05$ )正关联。

### 3.2.2 $\chi^2$ 检验

各样地草本植物优势种  $\chi^2$  检验结果(表8~11)显示, S1的10个种对间有7对正关联, 3对负关联, 正负关联比为2.33; 其中显著2对, 不显著8对, 分别占总对数的20.00%和80.00%。呈显著( $P < 0.05$ )正关联的种对包括: 白莲蒿-兴安胡枝子、白莲蒿-野菊。S2的66个种对间有27对正关联, 39对负关联, 正负关联比为0.69; 其中显著14对, 不显著52对, 分别占总对数的21.21%和78.79%。呈极显著( $P < 0.01$ )正关联的种对包括: 驴欺口-大油芒、驴欺口-野棉花、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)-委陵菜(*Potentilla chinensis*)、白羊草-铃铃香青; 呈显著( $P < 0.05$ )正关联的种对为三脉紫菀-野棉花; 呈极显著( $P < 0.01$ )负关联的种对包括: 小红菊-驴欺口、小红菊-大油芒、小红菊-石沙参(*Adenophora polyantha*)、驴欺口-委陵菜; 呈显著( $P < 0.05$ )负关联的种对包括: 驴欺口-白羊草、大油芒-白莲蒿、大油芒-委陵菜、白莲蒿-三脉紫菀、白莲蒿-铃铃香青。S3的36个种对间有16对正关联, 19对负关联, 1对无关联, 正负关联比为0.84; 其中显著6对,

表8 样地1草本层优势种  $\chi^2$  检验半矩阵Tab. 8 Semi-matrix of  $\chi^2$  test results in herb layer of sample plot 1

S1	Cl	Dc	Ld	As	Di
Cl	-				
Dc	-0.00	-			
Ld	-0.35	1.00	-		
As	0.02	2.92	6.38*	-	
Di	-1.86	0.79	0.86	6.62*	-

注: \*代表 $P < 0.05$ 。下同。Notes: \* means  $P < 0.05$ . The same below.

不显著30对, 分别占总对数的16.67%和83.33%。呈极显著( $P < 0.01$ )正关联的种对包括: 小红菊-地榆、白莲蒿-兴安胡枝子; 呈显著( $P < 0.05$ )正关联的种对包括: 地榆-驴欺口、地榆-风毛菊; 呈显著( $P < 0.05$ )负关联的种对包括: 白莲蒿-地榆、白莲蒿-茜草。S4的45个种对间有17对正关联, 27对负关联, 1对无关联, 正负关联比为0.63; 其中显著4对, 不显著41对, 分别占总对数的8.89%和91.11%。呈显著( $P < 0.05$ )正关联的种对为南牡蒿(*Artemisia eriopoda*)-裂叶堇菜(*Viola dissecta*); 呈极显著( $P <$

表9 样地2草本层优势种  $\chi^2$  检验半矩阵Tab. 9 Semi-matrix of  $\chi^2$  test results in herb layer of sample plot 2

S2	Cl	Dc	El	Ss	Bi	As	Pc	Ah	Aa	Ec	Anv	Adp
Cl	-											
Dc	3.76	-										
El	0.38	-7.24**	-									
Ss	1.03	-20.42**	16.03**	-								
Bi	1.03	-0.04	-4.84*	-2.39	-							
As	-0.58	-0.67	-0.42	-4.41*	0.07	-						
Pc	0.05	0.24	-8.46**	-5.43*	8.45**	0.00	-					
Ah	1.62	0.05	-0.23	-2.81	9.63**	-5.10*	0.09	-				
Aa	-0.22	-3.56	1.02	0.14	0.10	-5.10*	0.09	0.02	-			
Ec	-3.40	-2.63	0.01	-1.24	-1.24	0.02	-0.08	-0.18	-0.18	-		
Anv	-1.02	-1.61	7.44**	1.38	-0.05	-2.50	-3.41	0.07	5.13*	-1.37	-	
Adp	-2.91	-6.85**	-1.22	-0.42	-0.42	0.52	0.67	-2.13	-2.13	2.47	-0.02	-

注: \*\*代表 $P < 0.01$ 。下同。Notes: \*\* means  $P < 0.01$ . The same below.

表 10 样地 3 草本层优势种  $\chi^2$  检验半矩阵Tab. 10 Semi-matrix of  $\chi^2$  test results in herb layer of sample plot 3

S3	Cl	Dc	As	El	Ld	So	Ap	Sj	Rc
Cl	-								
Dc	0.00	-							
As	0.09	0.38	-						
El	0.67	3.33	-3.59	-					
Ld	0.92	2.93	15.22**	0.38	-				
So	-0.15	10.54**	-4.47*	4.92*	0.09	-			
Ap	-0.17	-0.00	0.00	-0.34	-1.87	-0.06	-		
Sj	-0.02	-0.02	-0.28	2.00	-0.02	4.24*	-0.02	-	
Rc	-3.54	-1.02	-5.66*	-2.74	-0.00	-0.08	0.02	-1.12	-

表 11 样地 4 草本层优势种  $\chi^2$  检验半矩阵Tab. 11 Semi-matrix of  $\chi^2$  test results in herb layer of sample plot 4

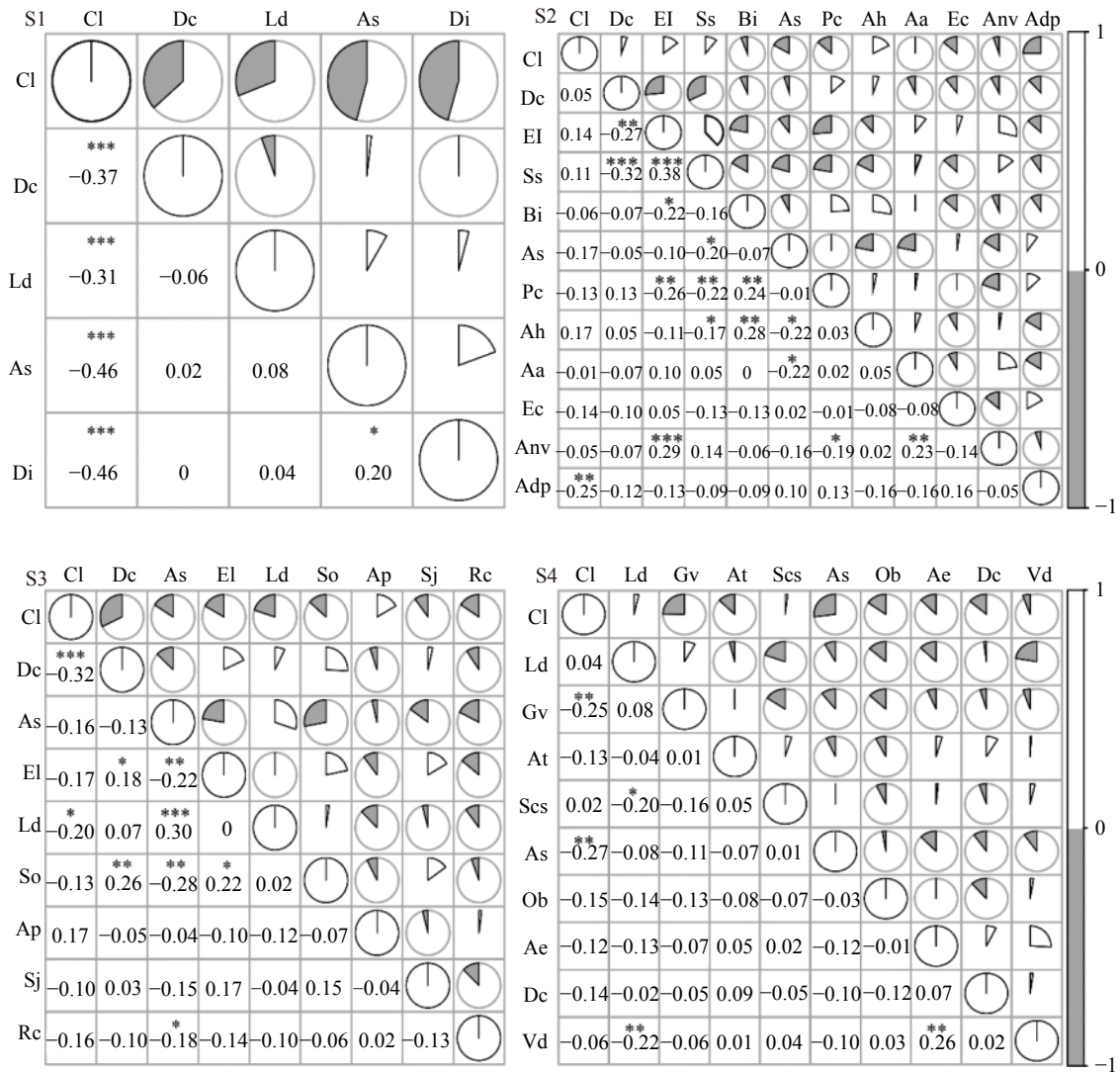
S4	Cl	Ld	Gv	At	Scs	As	Ob	Ae	Dc	Vd
Cl	-									
Ld	0.04	-								
Gv	-10.19**	0.56	-							
At	-0.42	0.15	0.00	-						
Scs	-0.26	-2.13	-1.93	0.00	-					
As	-9.84**	0.12	-0.56	-0.12	0.00	-				
Ob	-2.30	-0.44	-0.95	-0.83	-0.34	-0.05	-			
Ae	-0.16	-1.77	-0.03	0.12	0.00	-1.03	-0.05	-		
Dc	-0.75	0.08	-0.23	0.17	-0.03	-0.41	-0.82	0.17	-	
Vd	0.04	-5.25*	-0.23	-0.17	0.03	-0.41	0.00	6.24*	0.09	-

0.01)负关联的种对包括:大披针藁草-少花米口袋、大披针藁草-白莲蒿;呈显著( $P < 0.05$ )负关联的种对为兴安胡枝子-裂叶堇菜。总体而言, $\chi^2$ 检验结果与多物种间的总体关联性检验结果一致。另外,各样地中呈显著相关的种对数占总对数的比例较小,表明火烧迹地草本层植物群落优势种间的联结性相对较弱。

### 3.2.3 Spearman 秩相关性检验

各样地草本植物优势种 Spearman 秩相关检验(图 1)显示,S1 的 10 个种对中,正关联的种对数为 5 个,负关联种对 5 个,各占总种对数的 50.00%,其中呈显著( $P < 0.05$ )正关联的种对 1 个,呈极显著( $P < 0.001$ )负关联的种对有 4 个,正负关联比为 1.00。根据秩相关系数半矩阵(图 1)可得出具有中等相关(|相关系数|为 0.3~0.5)、弱相关(|相关系数|为 0.1~0.3)和无相关(|相关系数|为 0~0.1)的种对各 4、1 和 5 个。S2 的 66 个种对中,正关联的种对数为 24 个,负关联种对 42 个,分别占总种对数的 14.29% 和 85.71%,其中呈极显著( $P < 0.001$  和  $P <$

0.01)正关联的种对有 5 个,呈极显著( $P < 0.001$  和  $P < 0.01$ )负关联的种对 5 个,呈显著( $P < 0.05$ )负关联的种对 6 个,正负关联比为 0.57。根据秩相关系数半矩阵(图 1)可得出具有中等相关、弱相关和无相关的种对各 2、37 和 27 个。S3 的 36 个种对中,正关联的种对数为 12 个,负关联种对 24 个,分别占总种对数的 33.33% 和 66.67%,其中呈极显著( $P < 0.001$  和  $P < 0.01$ )正关联的种对有 2 个,显著( $P < 0.05$ )正关联的种对 2 个,呈极显著( $P < 0.001$  和  $P < 0.01$ )负关联的种对有 3 个,显著( $P < 0.05$ )负关联的种对 2 个,正负关联比为 0.50。根据秩相关系数半矩阵(图 1)可得出具有中等相关、弱相关和无相关的种对各 2、23 和 11 个。S4 的 45 个种对中,正关联的种对数为 15 个,负关联种对 30 个,分别占总种对数的 33.33% 和 66.67%,其中呈极显著( $P < 0.01$ )正关联的种对有 1 个,呈极显著( $P < 0.01$ )负关联的种对有 3 个,呈显著( $P < 0.05$ )负关联的种对 1 个,正负关联比为 0.50。根据秩相关系数半矩阵(图 1)可得出具有弱相关和无相关的种对各 18 和 27 个。S1 ~



\*\*\*P < 0.001

图1 各样地草本层优势种 Spearman 相关性半矩阵图

Fig. 1 Spearman association semimatrix of dominant plant species in herb layer

S4 样地中呈极显著和显著相关的种对数出现的频率分别为 50.00%、24.24%、25.00%、11.11%，表明 S1 样地草本植物优势种间联结较为紧密，其余 3 个样地的种间联结性较差，该结果与  $\chi^2$  检验结果虽略有差别，但总体趋势一致。

### 3.3 生态种组划分

为了更真实地反映火烧迹地植物群落和优势种群的关系以及优势种群对火烧迹地生境主要影响因子的适应方式，分别对 4 个样地优势种在 135 个小样格中的重要值数据进行 PCA 排序，然后进行聚类，同时综合  $\chi^2$  检验和 Spearman 秩相关检验的结果，分别将各样地草本植物优势种划分为 3 个生态种组(图 2)。

S1 中第 1 生态种组包括：大披针藁草、小红菊、兴安胡枝子；第 2 生态种组包括：白莲蒿；第 3 生态种组包括：野菊。

S2 中第 1 生态种组包括：三脉紫菀、大油芒、野棉花、驴欺口；第 2 生态种组包括：大披针藁草、小红菊、铃铃香青、白羊草、委陵菜；第 3 生态种组包括：白莲蒿、香薷(*Elsholtzia ciliata*)、石沙参。

S3 中第 1 生态种组包括：白莲蒿、兴安胡枝子；第 2 生态种组包括：京芒草、茜草；第 3 生态种组包括：大披针藁草、小红菊、驴欺口、风毛菊、地榆。

S4 中第 1 生态种组包括：大披针藁草、兴安胡枝子、少花米口袋；第 2 生态种组包括：白莲蒿、地角儿苗(*Oxytropis bicolor*)；第 3 生态种组包括：小红菊、南牡蒿、芥苳(*Adenophora trachelioides*)、裂叶堇菜、桃叶鸦葱。

## 4 讨 论

植物群落处在不断的动态变化当中，群落中的物种会受到环境条件和其他物种的双重影响，而生



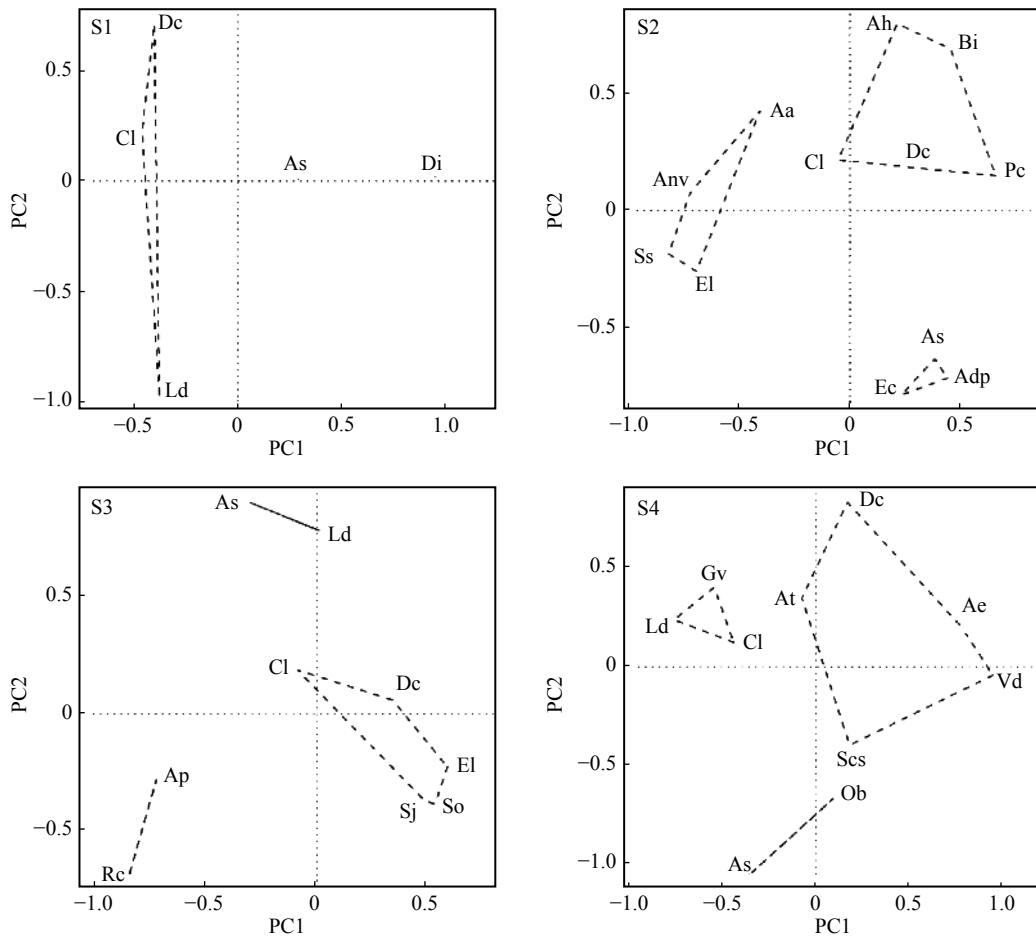


图2 各样地草本层优势种生态相似性关系排序和分组

Fig. 2 Sorting and grouping of ecological similarity relationship of dominant plants in herb layer

态位宽度和生态位重叠值是解释植物对资源环境的利用和竞争状态最好的指标<sup>[21]</sup>。通过对太行山南段不同恢复期火烧迹地草本层优势种生态位宽度和生态位重叠的研究,发现火烧迹地草本层优势种以多年生草本植物为主,数量上则表现为S2最多(12个),S1最少(5个),而且呈现随着恢复时间的增加而先增加后减少的趋势。在火烧迹地不同恢复期的植物群落中,大披针藁草的生态位宽度均最大,除S4外,小红菊的生态位宽度居第2位,这是由于大披针藁草和小红菊均为多年生草本,且都比较耐旱,而大披针藁草为密丛型草本植物,相对更耐荫,对资源利用能力更强,二者都能适应火烧迹地的环境,在火后各个恢复期均可广泛分布。同一优势种在不同恢复期的生态位宽度也会存在一定差异,在野外调查中,观察到有些物种在某一样地是优势种,但在另一个样地中只是伴生种,如兴安胡枝子、少花米口袋等,这是恢复时间不同导致同一物种表现出不同的生态位。而香薷、裂叶堇菜、铃铃香青等物种往往集中分布于某些样地的特殊生境中,仅作为共优势种或者是优势种的伴生种,该结果与陈林等<sup>[22]</sup>对荒漠草原不同生境中物种生态位的研究结果一致。物种生态

位宽度越大,分布范围越广,资源利用越充分,适应和竞争能力越强,其种群生长与扩散越快,同时与其他物种的生态位重叠值也越大,这一现象在火烧迹地各个恢复期均得以体现。生态位重叠一般发生在群落的优势种之间,其中生态位重叠值为0的种对较少,分别出现在S2和S4的10个和4个物种对中。S1中优势植物种间生态位重叠值相对较大,其余3个样地则较小,4个样地中生态位重叠值大于0.5的种对数分别占各样地总种对数的40.00%、10.61%、25.00%、4.44%。生态位重叠值分配格局表明,火烧迹地各种资源较为充足,物种生态位分化程度较高,种间竞争较小。

优势种间呈现正关联则表明群落相对稳定。种间总体相关性检验发现,S1为显著正关联,S2和S4为显著负关联,S3为不显著正关联。 $\chi^2$ 检验和Spearman检验结果基本一致,二者分析结果(表12)均表明S1的10个种对中,正关联种对数多于负关联种对数, $\chi^2$ 检验得正负关联比为2.33,Spearman秩相关检验得正负关联比为1.00,而S2、S3和S4中均为负关联的种对数多于正关联种对数,正负关联比率均小于1,说明绝大多数种对之间存在负关联,这

表 12 群落优势种种间关联和相关统计

Tab. 12 Interspecific association and association among dominant species in community

样地 Sample plot	检验法 Test method	正关联 Positive association		负关联 Negative association		无关联 No association	
		种对 Species pair	占比 Percentage/%	种对 Species pair	占比 Percentage/%	种对 Species pair	占比 Percentage/%
S1	$\chi^2$	7	70.00	3	30.00	0	0.00
	Spearman	5	50.00	5	50.00	0	0.00
S2	$\chi^2$	27	40.91	39	59.09	0	0.00
	Spearman	24	36.36	42	63.64	0	0.00
S3	$\chi^2$	16	44.44	19	52.78	1	2.78
	Spearman	12	33.33	24	66.67	0	0.00
S4	$\chi^2$	17	37.78	27	60.00	1	2.22
	Spearman	15	33.33	30	66.67	0	0.00

说明火烧迹地的次生植物群落可能具有更多的负种间关联,该结果与 Gu 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。Zhang 等<sup>[24]</sup>研究认为,正负关联比率低于 1,群落不稳定,可能由于群落处在演替初期或发生次生演替以及人为干扰等因素引起。反之,正负关联比越高,群落结构越趋于稳定,物种间可以稳定共存,群落达到与环境条件相适应的稳定阶段<sup>[25]</sup>。从各样地种间相关性检验结果可发现,随着恢复时间的增加,正负关联比逐渐增加,且 S1 的正负关联比最大,表明火烧迹地植物群落逐渐趋于稳定,在恢复 13 年时群落稳定性最大。

种间关联反映了群落生境的差异,种间关联测定可表达物种间的相互关系以及它们与环境因子的作用关系,种间关联的显著性与群落的稳定性有必然的关系<sup>[26]</sup>。不同恢复期植物群落种群间竞争和适应导致了群落结构的复杂性和资源利用的多样性。随着恢复时间的增加,优势植物的种类和数量均发生了改变,种间关联模式也发生了变化,这可能是随着恢复时间推移,火烧迹地各种环境梯度发生变化<sup>[27]</sup>,同时随着灌木的恢复,草本植物的资源位发生改变。恢复初期(S4),一些成功入侵的物种可能会争夺相同的资源,如少花米口袋、兴安胡枝子等,而随着恢复时间的变化,物种间相互作用,利用不同的资源斑块或梯度,形成了不同的种组。种间关系也将同步趋于正关联,多物种间实现共存,群落种类组成及结构逐渐趋于完善和稳定。该变化趋势与奇凯等<sup>[28]</sup>对赤峰市沙地油松林草本植物种间关联以及周先叶等<sup>[29]</sup>对广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落种间联结的研究结果基本一致。恢复后期(S1)的群落比较稳定,与其他群落相比差异较大。由  $\chi^2$  检验 Spearman 秩相关分析可知,白莲蒿-兴安胡枝子、白莲蒿-野菊、白羊草-委陵菜、驴欺口-地

榆、驴欺口-小红菊、小红菊-地榆等种对间呈正关联,这些物种对生境要求相似,而且生态适应能力较强,可作为火烧迹地植被恢复的优选物种进行混种。而种对间呈负关联,可能是由于种间互相竞争或对生态适应性不同所造成<sup>[26]</sup>,如大披针藁草-白莲蒿等,在火烧迹地生态恢复植物配置时不宜混种。同时发现大披针藁草在各个恢复期和其他优势种之间均呈现负关联,表明研究区大披针藁草生态位的独特性,但不同恢复期大披针藁草的生态位宽度均最大,为研究区的绝对优势种,在植被快速恢复和减缓水土流失等方面发挥着重要作用,所以研究区在生态修复过程中进行植物配置时可以优先选择大披针藁草种植,并且可以适当增加其所占比例。

生态种组不仅比单一物种在指示环境条件方面更具优势,而且更能表明物种共存的过程和机制,进而指导植被恢复时物种筛选和配置模式<sup>[27]</sup>。根据  $\chi^2$  检验、Spearman 秩相关检验及排序分组的结果,发现具有较高关联性的优势种划分为同一生态种组,该结果与奇凯<sup>[28]</sup>和 Su<sup>[30]</sup>等学者的研究结果一致。这可能由于同一生态种组内物种对资源的利用能力、环境的适应能力以及植物群落结构影响等方面表现出共性,共存几率更大。而不同生态种组间的物种则具有不同的生态习性,在植物群落动态变化过程中不同生态种组长期适应微环境并占据不同资源空间。恢复初期(S4)的优势种基本可以划分为由大披针藁草、小红菊和白莲蒿所代表的 3 个生态种组,恢复中期(S2、S3)和恢复后期(S1)的优势种基本可以划分为由大披针藁草+小红菊、白莲蒿和其他优势种为代表的 3 个生态种组。生态种组划分既可以反映出群落的稳定性,同时也可作为火烧迹地植物群落恢复提供值得借鉴的植物配置模型。大披针藁草、小红菊和白莲蒿在火烧迹地植物群落组成中发

挥着重要作用,所以在植物配置的时候考虑优先选择该3种植物,然后进行相应的搭配。这样既有利于恢复初期植物群落的快速恢复,同时又兼顾了植物群落的动态变化,为恢复过程中以及后期的植物群落结构奠定基础。

## 5 结 论

太行山南段油松林火烧迹地不同恢复期草本层优势种的种类、重要值和生态位宽度均不同,但主要优势种均为大披针藁草、小红菊和白莲蒿。随着恢复时间增加,草本层逐渐趋于稳定,在恢复13年左右稳定性最大。在太行山南段油松林火烧迹地草本层恢复过程中进行植物配置时,应选择各恢复期的优势种,且优先考虑栽种大披针藁草、小红菊和白莲蒿。

### 参 考 文 献

- [1] Harpole W S, Tilman D. Grassland species loss resulting from reduced niche dimension[J]. *Nature*, 2007, 446: 791–793.
- [2] Walker C L R. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities[J]. *Ecology*, 1997, 78(7): 1958–1965.
- [3] Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405: 208–211.
- [4] Moloney K A, Levin S A. The effects of disturbance architecture on landscape-level population dynamics[J]. *Ecology*, 1996, 77(2): 375–394.
- [5] 张东梅, 赵文智, 罗维成. 荒漠草原带盐碱地优势植物生态位与种间联结[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1307–1315.
- Zhang D M, Zhao W Z, Luo W C. Niche and interspecific association of dominant plant species in saline-alkaline soils of desert steppe zone[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1307–1315.
- [6] 郭水良, 于晶, 陈国奇. 生态学数据分析: 方法、程序与软件[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Guo S L, Yu J, Chen G Q. Ecological data analyses: methods, programs and software[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] Pielou E C. Niche width and niche overlap: a method for measuring them[J]. *Ecology*, 1972, 53(4): 687–692.
- [8] Rousset O, Lepart J. Positive and negative interactions at different life stages of a colonizing species (*Quercus humilis*)[J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88(3): 400–412.
- [9] Li Y I, Xu H, Chen D X, et al. Division of ecological species groups and functional groups based on interspecific association: a case study of the tree layer in the tropical lowland rainforest of Jianfengling in Hainan Island, China[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2008, 3(4): 407–415.
- [10] Mangla S, Sheley R L, James J J, et al. Intra and interspecific competition among invasive and native species during early stages of plant growth[J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(4): 531–542.
- [11] 武帅楷. 三峡水库消落带植物群落生态学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- Wu S K. Studies on ecology of plant communities in the drawdown zone of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [12] 王健铭, 董芳宇, 巴海·那斯拉, 等. 中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3488–3498.
- Wang J M, Dong F Y, Nasina B, et al. Plant distribution patterns and the factors influencing plant diversity in the Black Gobi Desert of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3488–3498.
- [13] 奚为民. 怀柔山区灌丛群落优势种群生态位的研究[J]. *植物生态学报*, 1993, 17(4): 324–330.
- Xi W M. Niche research of scrub dominant population in Huairou Mountainous Region of Beijing Area[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1993, 17(4): 324–330.
- [14] 何芳兰, 刘世增, 李昌龙, 等. 甘肃河西戈壁植物群落组成特征及其多样性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 74–78.
- He F L, Liu S Z, Li C L, et al. Study on composition and diversity of phytocoenosis in Gobi region of Hexi, Gansu[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(4): 74–78.
- [15] Chasw J M, Belovsky G E. Experimental evidence for the included niche[J]. *American Naturalist*, 1994, 143(3): 514–527.
- [16] 蓝俊杰. 漠河地区火烧迹地落叶松林群落物种组成及多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Lan J J. Study on community species composition and diversity of *Larix gmelinii* burned area in Mohe[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [17] Roscher C, Schumacher J, Lipowsky A. Functional groups differ in trait means, but not in trait plasticity to species richness in local grassland communities[J]. *Ecology*, 2018, 99(10): 2295–2307.
- [18] 吴志庄, 厉月桥, 汪泽军, 等. 太行山黄连木天然群落物种多样性的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(12): 15–18.
- Wu Z Z, Li Y Q, Wang Z J, et al. Study on species diversity of *Pistacia chinensis* natural communities in Taihang Mountains[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(12): 15–18.
- [19] Kikvidze Z, Ohsawa M. Measuring the number of co-dominants in ecological communities[J]. *Ecological Research*, 2010, 17(4): 519–525.
- [20] 张金屯. 数量生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.
- Zhang J T. Quantitative ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011.
- [21] Miura M, Manabe T, Nishimura N, et al. Forest canopy and community dynamics in a temperate old-growth evergreen broad-leaved forest, south-western Japan: a 7-year study of a 4-ha plot[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(5): 841–849.
- [22] 陈林, 辛佳宁, 苏莹, 等. 异质生境对荒漠草原植物群落组成和种群生态位的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6187–6025.
- Chen L, Xin J N, Su Y, et al. Effects of heterogeneous habitats on community composition and niche characteristics of different plant populations in the desert steppe of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6187–6025.

- [23] Gu L, Gong Z W, Li W Z. Niches and interspecific associations of dominant populations in three changed stages of natural secondary forests on Loess Plateau, P. R. China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6604.
- [24] Zhang M T, Kang X G, Meng J H, et al. Distribution patterns and associations of dominant tree species in a mixed coniferous-broadleaf forest in the Changbai Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(3): 659–670.
- [25] 张苗苗, 王咏雪, 田阔, 等. 台州玉环北部沿岸海域主要游泳动物生态位和种间联结性[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3867–3875.
- Zhang M M, Wang Y X, Tian K, et al. Niche and interspecific associations of major nekton in northern coastal waters in Yuhuan, Taizhou, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3867–3875.
- [26] Pickett S T A. Population patterns through twenty years of old field succession[J]. *Vegetatio*, 1982, 49(1): 45–59.
- [27] Fesl C. Biodiversity and resource use of larval chironomids in relation to environmental factors in a large river[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(6): 1065–1087.
- [28] 奇凯, 张春雨, 侯继华, 等. 赤峰市沙地油松林草本植物多样性及种间关联动态[J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 5106–5112.
- Ji K, Zhang C Y, Hou J H, et al. Dynamics of species diversity and interspecific associations of herbaceous plants in a *Pinus tabulaeformis* forest on a sandy site in Chifeng, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 5106–5112.
- [29] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 等. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落的种间联结性分析[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 332–339.
- Zhou X Y, Wang B S, Li M G, et al. An analysis of interspecific associations in secondary succession forest communities in Heishiding Natural Reserve, Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(3): 332–339.
- [30] Su S J, Liu J F, He Z S, et al. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain National Nature Reserve[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(3): 637–646.

(责任编辑 赵勃  
责任编辑委 臧润国)