

安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间关联*

白文霞 李素清** 狄晓艳

山西大学黄土高原研究所 太原 030006

摘要 为探明煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间关系和生态位特征,采用 χ^2 检验、Pearson相关系数、Spearman秩相关系数、生态位宽度与重叠指数,研究安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种的种间关系和生态位。结果显示,13个优势种的78个种对中,3种检验方法的正负关联比分别为37.2%、28.2%和32.1%;优势种冰草/披碱草/紫花苜蓿与西北针茅、披碱草与白榆幼苗/紫花苜蓿呈正相关;13个优势种划分为3个生态种组,导致其生态种组分化的主导因子是土壤水分;13个优势种的生态位宽度与重要值呈显著正相关,而其生态位宽度与重叠之间不存在直接的线性关系。综上表明,安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落种间联结较为松散,优势种冰草/披碱草/紫花苜蓿与西北针茅、披碱草与白榆幼苗/紫花苜蓿可用于该矿区植被恢复的优选先锋草本植物种进行混合种植。(图1表6参19)

关键词 煤矿复垦地;草本植物;优势种;种间关系;生态位

CLC Q948.1 : X171.4

Interspecific associations of dominant herbaceous plant communities under different plantations on reclaimed dumps in the Antaibao opencast mine*

BAI Wenxia, LI Suqing** & DI Xiaoyan

Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract The interspecific associations and niche characteristics of dominant herbaceous plants under different plantations on reclaimed dumps in the Antaibao opencast mine were elucidated by investigating the interspecific associations and ecological niche among 13 dominant herbaceous species under different plantations by using χ^2 test, Pearson correlation coefficient, Spearman rank correlation coefficient, niche breadth, and overlap indices. The results showed that, among 78 species pairs of the 13 dominant herbaceous species, the positive and negative correlation ratio according to χ^2 test, Pearson correlation coefficient, and Spearman rank correlation were 37.2%, 28.2%, and 32.1%, respectively; the dominant species pairs of *Agropyron cristatum*/*Elymus dahuricus*/*Medicago sativa* and *Stipa sareptana* as well as *Elymus dahuricus* and *Ulmus pumila* (seedling)/*Medicago sativa* showed positive correlations. According to Spearman's rank correlation coefficients, the 13 dominant species were classified into 3 ecological species groups, with soil moisture being the key factor responsible for the differentiation of these species groups. The niche breadths of the 13 dominant herbaceous species were positively correlated with the important value, whereas no direct linear relationship was noted between their niche breadth and overlap. In summary, interspecific associations of most species pairs among herbaceous plants under different plantations in the Antaibao opencast mine were relatively loose. The dominant species pairs identified in this study could be used as preferred herbaceous plant species pairs for mixed planting in future waste dump revegetation in the Antaibao opencast mine.

Keywords reclaimed dump of opencast mine; herbaceous plant; dominant species; interspecific association; ecological niche

矿区生态恢复与重建是当前国际社会普遍关注的热点问题之一,特别是大型露天煤矿废弃地的人工植被恢复研究已成为当前学术界研究的重点领域之一。山西省作为全国重

要的煤炭基地,长期高强度、大规模的煤炭开采造成矿区土壤-植被生态系统的严重破坏,严重威胁矿区的可持续发展。植被的自然恢复往往需要50-100年的时间才能用理想的植被覆盖,而人工植被恢复与重建可以显著加快其演替过程,促进生态环境改善。

种间关联是研究物种间相互作用的定量关系,揭示种间相互作用及物种与环境间的耦合关系^[1],反映不同物种在空间分布及其种间功能关系中的相互联系^[2],生态位是表示物

收稿日期 Received: 2017-06-26 接受日期 Accepted: 2017-08-28

*国家自然科学基金项目(41271531)和山西省第七批百人计划项目(207521013)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41271531) and the 100 Talents Program of Shanxi, China (207521013)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: lisuqing@sxu.edu.cn)

种与其环境之间的相互关系. 研究物种的种间关联和生态位对于理解种群相互关系^[3]、群落结构^[4]、功能和演替^[5]等具有重要作用.

地处黄土高原东部山西省朔州市的安太堡露天煤矿, 为我国五大露天煤矿之一, 自1987年复垦以来, 先后在南排土场、西排土场等地种植植物100余种, 土地复垦率达50%以上, 植被覆盖率达90%以上, 为开展排土场人工植被生态恢复研究的典型矿区^[6]. 矿区复垦地内排土场的立地地形情况分为平台和边坡两类, 其覆土厚度分别为1 m和50 cm, 且复垦地乔木和灌木的密度分别为2 m × 2 m、1 m × 1 m. 多数学者对该矿区复垦地人工植被恢复的研究主要集中在乔灌木群落结构与动态、生态位、种间关系、物种多样性等方面^[7], 如郝蓉、彭少麟等通过黄土区露天煤矿废弃地植被恢复动态的研究^[8], 郭道宇、张金屯等通过安太堡矿区植被恢复中植被生态位梯度变化的研究^[9]以及对安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析的研究^[10], 原野、赵中秋等对安太堡露天煤矿复垦地草本植物生态位的研究^[11]等, 对该复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间关系研究报道比较少, 而草本植物群落有较高的物种多样性和丰富度. 基于此, 我们采用 χ^2 检验、Pearson相关系数和Spearman秩相关系数与生态位测定方法, 研究安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间关系及生态位, 为筛选适合矿区废弃地植被恢复的先锋物种及其配置模式、促进矿区生态恢复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安太堡露天煤矿位于黄土高原东部、山西省朔州市平鲁区境内, 是一个典型的生态脆弱区. 该区属温带半干旱大陆性季风气候, 年均气温4.8-7.8 °C, 无霜期约115-130

d, 年均降水量450 mm左右, 土壤类型为栗钙土与栗褐土的过渡类型, 地带性植被类型属于森林草原过渡带^[12].

1.2 研究方法

1.2.1 取样 2017年7月在安太堡露天煤矿区南排、西排、西排外排土场复垦地, 采用系统取样方法^[13], 根据海拔(1 358-1 520 m)从复垦地底部到顶部设置1 m × 1 m样方63个, 对不同植被类型下草本植物群落进行地植物学调查. 记录每个样方中植物种的名称、盖度等数量指标, 并记录每个样方的海拔高度、坡度等环境因子. 63个样方共记录草本植物49种, 依据各物种的重要值大小, 并综合其在样方中的盖度、高度及出现的频率^[14], 从中选取13个优势种(表1), 形成63 × 13的数据矩阵, 进行种间关联性与生态位特征分析.

1.2.2 种间关联性分析 根据各样方内物种的存在与否将63 × 13的数据矩阵转变为0、1形式的二元数据矩阵, 进行 χ^2 检验^[14].

1.2.3 种间相关性测定 采用重要值指标处理数据所构成的63 × 13数据矩阵, 进行Pearson相关检验和Spearman秩相关检验^[14].

1.2.4 生态位宽度与生态位重叠指数 分别采用Shannon-Wiener指数^[15]和Pianka指数(1973)^[16]测定群落优势种的生态位宽度和生态位重叠.

2 结果与分析

2.1 χ^2 检验

Yates公式校正后的 χ^2 检验值半矩阵表(表2)显示, 安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种组成的78个种对中, 呈正负关联的种对分别占总对数的37.2%(29对)和62.8%(49对), 正负关联比小于1. 其中呈极显著正关联和显著正关联的种对分别占总对数的3.85%(3对)和2.56%(2对), 包括茵陈蒿(*Artemisia gmelinii*)

表1 不同植被类型下13个草本植物优势种及其特征

Table 1 Dominant species and their characteristics of the 13 herbaceous plants under different plantations

序号 No.	植物种 Plant species	生态类型 Ecotype	重要值 Important value (IV)	频度 Frequency (f/%)	所在植被类型 Under plantations
1	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> *	X	17.35	52.38	a, b, c, d, e, f, g, h, i, k, l, n, CK
2	冰草 <i>Agropyron cristatum</i> *	X	6.05	20.63	a, b, c, d, g, i, m
3	西北针茅 <i>Stipa sareptana</i>	X	6.37	30.16	a, c, d, f, h, l, CK
4	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	MX	7.06	41.27	a, c, e, g, h, i, j, k, l, n, CK
5	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	X	4.80	33.33	a, b, c, e, f, g, h, i, k, l, m, CK
6	白莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	MX	2.87	12.70	b, c, f, h, i
7	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	X	5.51	26.98	b, e, f, g, h, i, CK
8	白榆幼苗 <i>Ulmus pumila</i> (seedling)	M	12.47	47.70	a, d, e, f, g, h, i, k, m, CK
9	牛皮消 <i>Cynanchum auriculatum</i>	M	2.32	12.70	d, h, i, l
10	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i> *	XM	5.01	19.05	a, d, e, i, k, l, n
11	草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	XM	1.94	15.87	a, b, h, i, k, m
12	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> *	XM	7.30	14.29	l, n
13	拂子茅 <i>Calamagrostis epigeios</i>	M	4.42	9.52	j, n, CK

*人工种植种. M: 中生; XM: 旱中生; MX: 中旱生; X: 旱生. a: 刺槐林; b: 新疆杨林; c: 柠条灌丛; d: 油松+刺槐林; e: 白杆林; f: 油松+山杏林; g: 白榆林; h: 刺槐+白榆林; i: 油松林; j: 拂子茅草地; k: 刺槐+白榆-沙棘林; l: 沙棘-紫花苜蓿灌丛; m: 油松+国槐林; n: 紫花苜蓿草地; CK: 对照.

* Planted species. M: Mesophyte; XM: Xero-mesophyte; MX: Meso-xerophyte; X: Xerophyte. a: *Robinia pseudoacacia* plantation; b: *Populus alba* var. *pyramidalis* plantation; c: *Caragana korshinskii* plantation; d: *Pinus tabulaeformis* + *Robinia pseudoacacia* plantation; e: *Picea meyeri* plantation; f: *Pinus tabulaeformis* + *Armeniaca sibirica* plantation; g: *Ulmus pumila* plantation; h: *Robinia pseudoacacia* + *Ulmus pumila* plantation; i: *Pinus tabulaeformis* plantation; j: *Calamagrostis epigeios* plantation; k: *Robinia pseudoacacia* + *Ulmus pumila* - *Hippophae rhamnoides* plantation; l: *Hippophae rhamnoides* - *Medicago sativa* plantation; m: *Pinus tabulaeformis* + *Sophora japonica* plantation; n: *Medicago sativa* plantation; CK: Control.

(4)与拂子茅(*Calamagrostis epigeios*) (13)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*) (5)与糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*) (7)、牛皮消(*Cynanchum auriculatum*) (9)与紫花苜蓿(*Medicago sativa*) (12)、沙生冰草(*Agropyron desertorum*) (1)与阿尔泰狗娃花(5)、西北针茅(*Stipa sareptana*) (3)与白莲蒿(*Artemisia gmelinii*) (6);呈极显著负关联和显著负关联的种对分别占总对数的1.28%(1对)和5.13%(4对),包括茵陈蒿(4)与白榆幼苗(*Ulmus pumila*) (seedling) (8)、冰草(*Agropyron cristatum*) (2)与茵陈蒿(4)、糙隐子草(7)与紫花苜蓿(12)、白榆幼苗(8)与紫花苜蓿(12)/拂子茅(13);呈不显著正关联和不显著负关联的种对分别占总对数的30.8%(24对)和56.4%(44对)。总的来说,78个种对中,优势种负关联种对略多于正关联种对。

2.2 Pearson相关系数

Pearson相关系数检验(表3)显示,78个种对中,呈正负关联的种对分别占总对数的28.2%(22对)和71.8%(56对)。其中仅有茵陈蒿(4)与拂子茅(13)呈极显著正关联;呈显著负关联的种对占总对数的6.67%(3对),包括白榆幼苗(8)与沙生冰草(1)/茵陈蒿(4)/阿尔泰狗娃花(5)。表明78个种对中大多数种对的种间关联未达到显著程度,优势种种间联

结性不强,这与 χ^2 检验的结果相似。

2.3 Spearman秩相关系数

由表4可知,Spearman秩相关检验中,78个种对中呈正、负关联的种对分别占总对数的32.1%(25对)和67.9%(53对)。其中呈极显著正关联和显著正关联的均占总对数的2.56%(2对),包括茵陈蒿(4)与拂子茅(13)、牛皮消(9)与紫花苜蓿(12)、糙隐子草(7)与沙生冰草(1)/阿尔泰狗娃花(5),仅有茵陈蒿(4)与白榆幼苗(8)呈极显著负关联,呈显著负关联的种对占总对数的3.85%(3对),包括沙生冰草(2)与茵陈蒿(4)、白榆幼苗(8)与紫花苜蓿(12)/拂子茅(13)。

2.4 χ^2 检验、Pearson相关系数和Spearman秩相关系数

比较 χ^2 检验(表2)、Pearson相关系数(表3)、Spearman秩相关系数检验(表4)可知,不同方法下种对间的检出结果存在显著差异(表5)。3种检验的正负关联比均为小于1,说明安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种的整体关联性较弱,对生境的适应性不同^[17]。Spearman秩相关分析中呈极显著与显著的种对数均比Pearson相关分析中相应的种对数多,表明Spearman秩相关分析较Pearson相关分析的灵敏度高。

表2 不同植被类型下13个草本植物优势种的 χ^2 检验半矩阵表

Table 2 Semi-matrix of χ^2 -test for the 13 dominant herbaceous species under different plantations

序号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.000												
2	-0.255	1.000											
3	2.806	0.003	1.000										
4	0.038	-4.528*	-1.054	1.000									
5	4.582*	-0.775	0.151	3.274	1.000								
6	0.376	1.592	4.550*	-3.129	1.145	1.000							
7	3.094	-0.127	-1.730	-1.351	6.808**	-0.018	1.000						
8	0.422	-0.551	-0.332	-7.602**	-1.145	0.021	-0.003	1.000					
9	-0.021	-0.370	1.713	-0.054	-1.790	-1.333	-3.387	0.021	1.000				
10	-0.682	-1.370	0.071	0.001	-1.853	-0.255	-2.617	-0.211	-2.156	1.000			
11	1.479	-0.003	-0.582	-0.623	3.804	-1.729	3.196	0.027	-0.078	0.007	1.000		
12	1.527	-2.730	1.017	2.794	-0.583	-1.527	-3.880*	-5.611*	9.545**	1.390	-0.178	1.000	
13	-0.015	-1.724	-2.864	9.437**	-0.829	-0.965	-2.451	-6.029*	-0.096	-1.560	-1.251	-1.105	1.000

序号所对应的物种见表1。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

Species codes are shown in Table 1. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

表3 不同植被类型下13个草本植物优势种的Pearson相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficients of the 13 dominant herbaceous species under different plantations

序号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.000												
2	-0.121	1.000											
3	-0.054	0.043	1.000										
4	-0.031	-0.234	-0.124	1.000									
5	0.160	-0.155	-0.054	0.154	1.000								
6	-0.140	0.073	0.186	-0.205	0.030	1.000							
7	0.178	0.057	-0.176	-0.247	0.071	0.013	1.000						
8	-0.258*	-0.067	-0.083	-0.315*	-0.264*	-0.011	-0.238	1.000					
9	-0.149	-0.099	0.055	-0.128	-0.127	-0.079	-0.126	-0.021	1.000				
10	-0.113	-0.180	-0.061	-0.036	-0.036	-0.030	-0.159	0.056	-0.105	1.000			
11	0.073	0.002	0.070	-0.130	0.080	-0.109	0.121	-0.091	-0.053	0.011	1.000		
12	-0.220	-0.181	-0.047	0.133	-0.071	-0.127	-0.203	-0.244	0.003	0.041	-0.077	1.000	
13	-0.123	-0.143	-0.172	0.564**	-0.058	-0.101	-0.160	-0.202	-0.075	-0.133	-0.103	-0.120	1.000

序号所对应的物种见表1。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

Species codes are shown in Table 1. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

表4 不同植被类型下13个草本植物优势种的Spearman秩相关系数
Table 4 Spearman's rank coefficients of the 13 dominant herbaceous species under different plantations

序号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.000												
2	-0.120	1.000											
3	-0.050	0.023	1.000										
4	0.017	-0.275*	-0.190	1.000									
5	0.235	-0.149	0.026	0.163	1.000								
6	-0.068	0.168	0.244	-0.237	0.121	1.000							
7	0.280*	-0.039	-0.172	-0.199	0.254*	-0.014	1.000						
8	-0.041	-0.067	-0.081	-0.409**	-0.232	0.015	-0.159	1.000					
9	-0.069	-0.102	0.135	-0.093	-0.171	-0.145	-0.227	0.031	1.000				
10	-0.106	-0.175	0.014	0.009	-0.139	-0.044	-0.202	0.011	-0.183	1.000			
11	0.195	-0.022	-0.081	-0.088	0.235	-0.164	0.234	-0.005	-0.027	0.004	1.000		
12	-0.195	-0.206	0.057	0.183	-0.087	-0.155	-0.243	-0.302*	0.328**	0.129	-0.059	1.000	
13	-0.070	-0.164	-0.208	0.489**	-0.088	-0.123	-0.194	-0.289*	-0.123	-0.156	-0.140	-0.132	1.000

序号所对应的物种见表1. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.
Species codes are shown in Table 1. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

表5 不同植被类型下13个草本植物优势种的 χ^2 检验、Pearson相关系数和Spearman秩相关系数比较
Table 5 The χ^2 -test, Pearson's correlation coefficients and Spearman's rank correlation coefficients of the 13 dominant herbaceous species under different plantations

检验方法 Test method	正关联的种对数 Positive correlation species pairs			负关联的种对数 Negative correlation species pairs		
	极显著 Distinctly significant ($P < 0.01$)	显著 Significant ($P < 0.05$)	不显著 Non-significant ($P > 0.05$)	极显著 Distinctly significant ($P < 0.01$)	显著 Significant ($P < 0.05$)	不显著 Non-significant ($P > 0.05$)
χ^2 检验 χ^2 -test	3	2	24	1	4	44
Pearson相关 Pearson's correlation	1	0	21	0	3	53
Spearman秩相关 Spearman's rank correlation	2	2	21	1	3	49

2.5 生态种组的划分

根据Spearman秩相关系数结果,并结合13个优势种对综合生态因子的适应性程度和种间联结的差异性,采用聚类分析方法,将安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种划分为3个生态种组(图1),导致其生态种组分化的主导因子是土壤水分。

生态种组I: 主要分布于刺槐林、柠条灌丛、紫花苜蓿草地等人工植被下,由自然定居的草本植物茵陈蒿(4)、拂子茅(13)组成,二者呈极显著正相关,对环境的干旱的生态适应能力强。

生态种组II: 主要分布于新疆杨林、油松林、白杆林、刺槐+白榆-沙棘林等人工植被下,由人工种植的沙生冰草(1)、自然定居的阿尔泰狗娃花(5)、糙隐子草(7)、草地风毛菊(*Saussurea amara*)(11)组成,组内各优势种种对间均呈正相关,对生长环境条件的需求相同,有一定的群落依存关系。

生态种组III: 主要分布于油松林、油松+白榆林、刺槐+白榆、沙棘-紫花苜蓿林等人工植被下,由人工种植的冰草(2)、披碱草(*Elymus dahuricus*)(10)、紫花苜蓿(12)、自然定居的西北针茅(3)、白莲蒿(6)、白榆幼苗(8)、牛皮消(9)组成。组内西北针茅(3)和冰草(2)/披碱草(10)/紫花苜蓿(12)、披碱草(10)和白榆幼苗(8)/紫花苜蓿(12)呈正相关。

2.6 物种生态位宽度指数和生态位重叠指数

由表6可知,在刺槐林、白榆林、油松林、白杆林等林型下的草本植物沙生冰草(1)、白榆幼苗(8)和茵陈

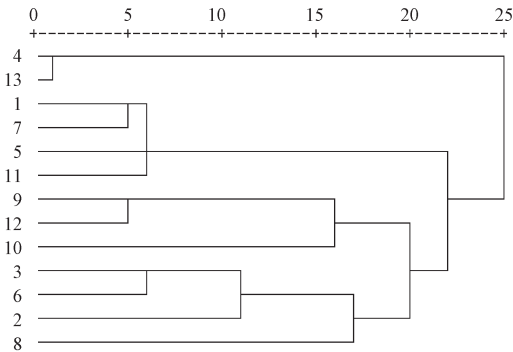


图1 不同植被类型下13个草本植物优势种的Spearman秩相关系数聚类图。
Fig. 1 Clustering diagram of Spearman's rank correlation coefficients among the 13 dominant herbaceous species under different plantations.

蒿(4)的生态位宽度最大。这些物种均为旱生或中旱生植物,在群落中的重要值也比较高,说明其对资源利用及对环境适应均有较强的能力,于干旱条件下能良好生长,在植物群落构建中有十分重要的作用,为该复垦地群落优势种。

由表6可知,物种间生态位重叠值在0.1-0.3之间的占总对数的52.6%(41对),生态位重叠值在0-0.1之间的占总对数的47.4%(37对)。种间生态位重叠程度总体偏高,说明物种间有相似的生态特性,且大部分物种对生境因子有互补性的要求。生态位与种间联结间有较好的相关性,生长于白榆林、白杆林等林型下的白莲蒿(6)与其余物种的生态位重叠值大多数为0,种间关系也表明白莲蒿与这些物种

表6 不同植被类型下13个草本植物优势种的生态位宽度及生态位重叠指数

Table 6 Niche breadth and niche overlap of the 13 dominant herbaceous species under different plantations

序号 No.	生态位宽度 Niche breadth	生态位重叠 Niche overlap												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	11.027													
2	4.373	0.196												
3	5.704	0.287	0.239											
4	7.242	0.355	0.063	0.187										
5	5.466	0.440	0.093	0.208	0.397									
6	2.391	0.105	0.193	0.305	0.014	0.182								
7	5.074	0.423	0.240	0.088	0.080	0.289	0.154							
8	8.165	0.197	0.178	0.204	0.090	0.086	0.160	0.074						
9	1.802	0.047	0.011	0.161	0.031	0.013	0.000	0.000	0.110					
10	3.893	0.184	0.016	0.144	0.197	0.173	0.096	0.053	0.258	0.000				
11	2.298	0.262	0.134	0.212	0.078	0.227	0.000	0.249	0.100	0.026	0.135			
12	2.866	0.086	0.000	0.138	0.307	0.128	0.000	0.000	0.006	0.087	0.178	0.047		
13	2.004	0.107	0.000	0.000	0.610	0.102	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

呈负相关。

披碱草(10)与草地风毛菊(11)/紫花苜蓿(12)间的生态位重叠比较大,但他们的生态位宽度值并不高,说明他们对生境具有相似的需求,茵陈蒿(4)、白榆幼苗(8)的生态位宽度值较大,但二者的重叠值 <0.3 ,说明其对资源利用方式不同,因此生态位宽度与重叠之间并不存在直接的线性关系(表6)。

3 结论与讨论

对安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种78个种对间种间关联和生态位的研究表明, χ^2 检验、Pearson相关系数和Spearman秩相关系数检验的正负种对间关联比均小于1,且大多种对间的关联程度达不到显著水平,说明安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间联结较为松散,仍处于向地带性植被演替的过程中。

种间联结测定可反映物种间的相互关系以及它们与环境因子的作用关系^[18]。由Spearman秩相关分析可知,优势种西北针茅(3)和冰草(2)/披碱草(10)/紫花苜蓿(12)、披碱草(10)和白榆幼苗(8)/紫花苜蓿(12)呈正相关,这些物种抗逆性强、生态适应性强,可用于人工植被恢复的优选物种进行混种;而种对呈显著负关联或负关联的物种,是由于对生境具有相异的生态适应性或互相竞争所造成^[17],如白榆幼苗(8)与紫花苜蓿(12)呈显著负关联,在生态恢复中不宜混种。

根据Spearman秩相关系数结果,采用聚类分析方法,将安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种划分为3个生态种组,导致其生态种组分化的主导因子是土壤水分。具有较高关联性和相关性的优势种划分为同一生态种组,这些物种在对环境的适应能力、资源的利用能力及在植物群落中的作用等表现出共性,而组间则表现出明显的差异性。因此,选择种间正联结性高的物种进行配置,可保证植物群落结构的合理性。

生态位的宽度与重叠反映了安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本群落各物种对资源的占据,是竞争协调的结果。生态位宽度和重要值可有效衡量物种在群落中地

位和作用,且通过分析物种的重要值可了解群落种群的变动情况^[19],生态位宽度较大的物种其重要值也较大,如刺槐林、刺槐+白榆林、油松+山杏林等植被类型下的沙生冰草(1)、西北针茅(3)、茵陈蒿(4)、白榆幼苗(8)。生态位宽度较大的物种之间的生态位重叠机会也较大,如在油松林、刺槐林、白榆林、白杆林等植被类型下的沙生冰草(1)与西北针茅(3)/白榆幼苗(8),西北针茅(3)与白榆幼苗(8),这些物种的资源利用谱宽,生态重叠较大,它们在共同适宜生存空间共存、竞争时资源需求较易得到满足,该结论与原野等的结论^[11]一致;生态位宽度较小的物种之间也有较高的生态位重叠,如牛皮消(9)与草地风毛菊(11)/紫花苜蓿(12)、草地风毛菊(11)与紫花苜蓿(12),生态位宽度与重叠之间并不存在直接的线性关系,这与霍红等研究结果^[1]一致。

种间联结与生态位都是表征种间相互作用的重要因素,二者间相关性较强。一般生态位重叠值较高的种对都具有显著的正联结性,比如茵陈蒿(4)与拂子茅(13)、糙隐子草(7)与沙生冰草(1)/阿尔泰狗娃花(5);而负联结显著的种对,重叠值很小或为零,比如白莲蒿(6)与大部分物种的生态位重叠值很小或为0,种间关系也表明白莲蒿与这些物种呈负相关。

综上,安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落13个优势种78个种对的正负关联比均小于1;大部分种对的种间关联不显著,说明该复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种种间联结较为松散,人工种植的优势种冰草/披碱草/紫花苜蓿与自然定居的西北针茅呈正相关,它们抗逆性强,生态适应性强,可用于未来该矿区植被恢复的优选先锋草本植物种进行混合种植;而白榆幼苗与紫花苜蓿呈显著负关联,在生态恢复中不宜混种。

参考文献 [References]

- 霍红,冯起,苏永红,司建华,席海洋,鱼腾飞. 额济纳绿洲植物群落种间关系和生态位研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33 (4): 1027-1033 [Huo H, Feng Q, Su YH, Si JH, Xi HY, Yu TF. Interspecies relationship and niche analysis on phytocoenosium in the Ejina Oasis [J]. *J Desert Res*, 2013, 33 (4): 1027-1033]
- 钟宇,张健,杨万勤,吴忠福,冯茂松,刘泉波. 巨桉人工林草本层优

- 势种的种间关系及生态种组的划分[J]. 草业学报, 2010, **19** (3): 56-62 [Zhong Y, Zhang J, Yang WQ, Wu ZF, Fen MS, Liu QB. Interspecific relationships and ecological species groups of dominant herbage species in *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Acta Pratac Sin*, 2010, **19** (3): 56-62]
- 3 韩锦涛, 李素清, 赵德怀, Karsten Liber. 晋西北丘陵风沙区人工植物群落优势种种间关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30** (12): 164-169 [Hai JT, Li SQ, Zhao DH, Karsten Liber. Interspecific relationships among dominant species in the planted vegetation communities in sandy hill regions of northwestern Shanxi, China [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2016, **30** (12): 164-169]
 - 4 张明霞, 王得祥, 康冰, 张岗岗, 刘璞, 杜焰玲, 于飞. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性[J]. 林业科学, 2015, **51** (1): 12-21 [Zhang MX, Wang DX, Kang B, Zhang GG, Liu P, Du YL, YF. Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Pinus armandii* in Qinling Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51** (1): 12-21]
 - 5 康永祥, 康博文, 岳军伟, 梁宗锁, 雷瑞德. 陕北黄土高原辽东栎群落类型划分及其生态位特征[J]. 生态学报, 2007, **27** (10): 4096-4105 [Kang YX, Kang BW, Yue JW, Liang ZS, Lei RD. The classification of *Quercus liaotungensis* communities and their niche in Loess Plateau of North Shaanxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (10): 4096-4105]
 - 6 岳建英, 郭春燕, 李晋川, 卢宁, 王翔, 李倩冉. 安太堡露天矿复垦区野生植物定居分析[J]. 干旱区研究, 2016, **33** (2): 399-409 [Yue JY, Guo CY, Li JC, Lu N, Wang X, Li QR. Colonized wild plants in the reclamation area of the Antaibao opencast coal mine [J]. *Arid Zone Res*, 2016, **33** (2): 399-409]
 - 7 王丽媛, 郭东罡, 白中科. 露天煤矿生态复垦区刺槐+油松混交林下草本植物组成及空间分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2012 **18** (3): 399-404 [Wang LY, Guo DG, Bai ZK. Species composition and spatial pattern of understory herbaceous plants on an ecological rehabilitation site from open coal mining [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (3): 399-404]
 - 8 郝蓉, 彭少麟, 白中科, 赵景逵, 宋艳曦. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, **23** (8): 1470-1476 [Hao R, Peng SL, Bai ZK, Zhao JK, Song YT. Vegetation dynamics during plant rehabilitation in degraded mined land of large opencast coal mine within loess area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (8): 1470-1476]
 - 9 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 董志. 安太堡矿区植被恢复过程主要种生态位梯度变化研究[J]. 西北植物学报, 2004, **24** (12): 2329-2334 [G XY, Zhang JT, Gong HL Dong Z. A study on gradual change of the dominant species' niche in the process of vegetation restoration of Antaibao mine [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2004, **24** (12): 2329-2334]
 - 10 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲. 安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析[J]. 生物多样性, 2007, **15** (1): 46-52 [Guo XY, Zhang JT, Gong HL, Zhang GL. Interspecific associations of restored vegetation and related soil factors in Antaibao mine, Shanxi [J]. *Biodiv Sci*, 2007, **15** (1): 46-52]
 - 11 原野, 赵中秋, 白中科, 王怀泉, 徐志果, 牛姝焯. 安太堡露天煤矿不同复垦模式下草本植物优势种生态位[J]. 生态学杂志, 2016, **35** (12): 3215-3222 [Yuan Y, Zhao ZQ, Bai ZK, Wang HQ Xu ZG, Niu SY. Niche characteristics of dominant herbaceous species under different land reclamation patterns in Antaibao Opencast Coal Mine [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (12): 3215-3222]
 - 12 Li SQ, Di XY, Wu DM, Zhang JT. Effects of sewage sludge and nitrogen fertilizer on herbage growth and soil fertility improvement in restoration of the abandoned opencast mining areas in Shanxi, China [J]. *Environ Earth Sci*, 2013, **70** (7): 3323-3333
 - 13 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004 [Zhang JT, Quantitative Vegetation Ecology [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2004]
 - 14 郭俊兵, 狄晓艳, 李素清. 山西大同矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (12): 3327-3332 [Guo JB, Di XY, Li SQ. Interspecific associations among dominant species in naturally colonized plant communities on coal gob piles of the Datong mining area in Shanxi, China [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (12): 27-3322]
 - 15 Liu LT, Wang XD, Wen Q, Jia QQ, Liu QJ. Interspecific associations of plant populations in rare earth mining wasteland in southern China [J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2017, **118**: 8-88
 - 16 Pianka ER. The structure of lizard communities [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1973, **4**: 53-74
 - 17 李木楠, 李志娟, 李素清, Karsten Liber. 山西阳泉矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (6): 1143-1149 [Li MN, Li ZJ, Li SQ, Karsten Liber. Interspecific association of dominant species in naturally colonized plant communities on coal gob piles of the Yangquan mining area in Shanxi, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (6): 1143-1149]
 - 18 孙澜, 苏智先, 严贤春, 张素兰. 金城山植物群落优势种群的种间关系[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14** (3): 314-318 [Sun L, Su ZX, Yan XC, Zhang SL. Interspecific relations of the dominant plant populations at Mt. Jincheng [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, **14** (3): 314-318]
 - 19 庞春花, 范晓, 张峰, 倪瑞军, 冯晓佳, 马晓波. 不同资源维度上汾河流域下游优势种的生态位[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (2): 380-386 [Pang CH, Fan X, Zhang F, Ni RJ, Feng XJ, Ma XB. The niches of dominant species in different resource dimensions in the lower reaches of fenhe river, Shanxi province of China [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (2): 380-386]