

安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化

郭逍宇^{1,2}, 张金屯³, 宫辉力^{1,2}, 张桂莲⁴, 董 志⁵

(1. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100037; 2 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037;
3. 北京师范大学生命科学院, 北京 100875; 4. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; 5. 首都师范大学生物系, 北京 100037)

摘要: 植被生态系统的重建是矿区复垦地恢复的主要环节之一。通过群落调查和实验分析, 采用丰富度指数、物种多样性指数和均匀度指数, 结合 DCCA 排序、多元线性回归和相关分析, 研究了平朔安太堡矿区复垦地植被恢复过程中多样性的变化。群落多样性分析结果表明: (1) 直接种植植被演替后期的植物种大大加速了原始植被演替进程; (2) 多样的人工配置群落比单一的人工配置群落更能促进群落向正向演替的方向发展; (3) 能够适应矿区特殊生境的植被配置方式在恢复进程中与自然植被表现出一定的差异, 这种差异只持续发生植被恢复的前 3a, 3a 之后群落的演替与自然植被的演替表现出趋同性; (4) 森林群落是较灌丛群落更适合安太堡矿区特殊生境的植被配置方式, 其中刺槐和油松的混交效果较好。物种多样性的分析表明: (1) 多样性偏高的群落与有机质和时间联系较为紧密, 而多样性偏低的群落则与锰的联系较为紧密; (2) 制约矿区物种多样性变化的主要因素是土壤水分和演替时间; (3) 锌对各多样性指数都有一定的影响; (4) 有机质、时间与丰富度指数相关显著; (5) 海拔与综合多样性指数相关显著; (6) 铜对均匀度指数的影响较大。方法的比较结果表明: (1) 多元线性回归的灵敏度比相关分析高; (2) DCCA 可以作为对定量分析的补充, 解释那些在定量分析中不显著的因子; (3) 多元线性回归中, Backward Regression 的效果比 Forward Regression 好。

关键词: 安太堡矿区复垦地植被恢复; 多样性; DCCA; 多元线性回归; 相关分析

Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China

GUO Xiao-Yu^{1,2}, ZHANG Jin-Tun³, GONG Hui-Li^{1,2}, ZHANG Gui-Liang⁴, Dong Zhi⁵ (1. Beijing Key Lab. for Resources Environment and GIS, Beijing, 100037, China; 2. Capital Normal University, Beijing 100037, China; 3. Biology Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, China; 5. Biology Department, Capital Normal University, Beijing 100037, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 763~770.

Abstract: vegetation restoration is one of the important methods of land reclamation in the mining field. This study applied the survey of communities, and the biological dating methods, the richness indices, diversity indices, evenness indices and DCCA, multi-factors liner regression, correlation analysis to analyze the relationships of community types, environmental variables and community structure in the process of vegetation restoration of Antaibao Mine, China. The results of community diversity are as follows: (1) experience with these various rehabilitation method by the introduction of later-succession plant species in mining area is much shorter than the general rotation; (2) high-diversity mixtures of species are better able to enhance the succession than low-diversity species mixtures; (3) The study compares differences in plant species composition that have been created artificially. The effect of these differences often refer to a relatively short period of the first three years. After that time, there is a same trend between the both; (4) forest community is more adaptable for the special inhabitation than the shrub community. In the process of succession, the change of community diversity show that the succession model of Robinia pseudoacacia- pinus tabulaeforms is suggested as the best one in this location. The results of the species diversity are: (1) high-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070140); 北京市教育委员会资助项目(KE200410028014)

收稿日期: 2003-11-03; **修订日期:** 2004-03-17

作者简介: 郭逍宇(1977~), 女, 山西文水人, 博士, 主要从事植被生态学研究, E-mail: xiaoyu771016@163.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30070140), the Project of Education Committee of Beijing (No. KE200410028014)

Received date: 2003-11-03; **Accepted date:** 2004-03-17

Biography: GUO Xiao-Yu, Ph. D., mainly engaged in vegetation ecology. E-mail: xiaoyu771016@163.com

diversity community is mainly influenced by the succession and organic, the low-diversity community is mainly influenced by Mn; (2)water conditions and succession time are the important factors influencing the change of diversity indices in Antaibo Mine. With increase of the water conditions in soil and the succession proccession, the diversity indices are increased; (3)the community indices are influenced by Zn; (4)the correlation of the abundance and organic matter are significant, so is the correlation of the abundance and time,; (5)the higher the elevation, the more the heterogeneous diversity; (6)Cu mainly influences evenness. The study of the methods indicates that: (1)the multi-factors liner regression is more effective than correlation analysis; (2)DCCA, as the supplement to the quantitative analysis, can explain the insignificant factors in the regression and correlation analysis; (3)Backward Regression is much better than Forward Regression.

Key words:vegetation restoration; diversity; DCCA; multi-factors liner regression; correlation analysis

文章编号:1000-0933(2005)04-0763-08 中图分类号:Q145+.2 文献标识码:A

安太堡矿区大型露天煤矿的开采造成了大规模的土地破坏,特别是土壤和植被。植被生态系统的重建成为矿区复垦地恢复的主要环节之一。从 1991 开始,国家投入大量的人力和物力在矿区合理配置乔、灌、草从而形成不同的配置模式。矿区的形式多样重建模式所经历的植被恢复过程比自然生态恢复周期短的多,同时这些配置模式随植被恢复进程的推移表现出能够适应矿区特殊生境的群落类型。多样性是一个群落结构和功能复杂性的度量^[1]。通过对群落多样性的研究可以很好地认识群落的组成、发展和变化。土壤环境因子也即土壤状况直接影响着植物的生长发育。因而,本文在群落调查和实验分析的基础上,从数量生态的角度定量的分析了安太堡矿区复垦地恢复过程植被多样性、土壤条件和地形因子的变化,旨在揭示植被群落的结构、生态、动态、分类,从而探讨适合矿区特殊生境的群落类型及制约矿区群落多样性变化的主要因素,进而为矿区下一步植被恢复的实际操作提供理论依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区

安太堡矿区位于黄土高原东部、山西省北部的朔州市平鲁区境内,与号称黄土高原“黑三角”的世界特大型神府东胜煤田相连,是一个维持自身稳定性较小的生态脆弱系统,矿区属典型的温带半干旱大陆性季风气候,矿区平均气温为 4.8~7.8℃,年降水量为 450mm 左右,而年蒸发量为年降水量的 5 倍左右。土壤类型为栗钙土与栗褐土的过渡类型。土壤物理风化作用强烈,土质偏砂,土体干旱,通气良好,微生物活动旺盛。矿区植被目前整体呈现农业景观,随煤炭的大量开采,植被完全破坏,生态环境恶化,矿区进行复垦地植被重建。

安太堡矿区植被复垦地主要有南排土场、西排土场和内排土场三大土场,从各排土场的立地地形情况又分为平台和边坡两类。平台构筑过程实际上是人工土体的再造即在矿区固体废弃物松散堆积体之上覆被厚度为 50~150cm 厚度不等的黄土母质,经机械结合人工平整后,进行植被复垦工作。边坡构筑过程主要考虑到雨季黄土层剥皮机率较大,因而直接在土石混堆物或浅层覆土上种植。由于先锋植物的配置状况不同,以及不同生境对不同配置状况的植物群落影响不同,从而形成了安太堡矿区现有植被群落类型。

1.2 研究方法

2002 年 7 月 在平朔安太堡矿区复垦地内,对不同演替阶段从海拔 1360~1520m,在西排、南排和内排土场设置样方,乔木林样方大小为 10m×10m,灌木林样方大小为 4m×4m,草本群落样方大小为 1m×1m,共计 63 个。调查记录内容包括:(1)物种名称及种的盖度和高度,乔木的株数及胸径;(2)群落综合特征和生境特征,包括群落总盖度、海拔、坡度、坡向等;(3)在每个样方中心,除去腐殖质层在大约 10cm 深的土层中取土,土壤样品拿回山西大学环境与资源学院环境监测实验室内进行分析。土壤样品的分析包括土壤有机质、土壤全氮、土壤全磷、电导率、钾、铜、锰、锌、pH 值 9 项因子(表 1)。63 个样方共记录 61 个种(表 2),这 61 个种的重要值计算结果组成得 63×61 的原始数据矩阵。本文分析的环境因子包括实验测定的土壤因子值和海拔(m)、时间(a)。海拔与时间以实际记录值表示,土壤因子以实验测定值表示。对环境因子数据进行最大值标准化,得 11×63 的环境因子数据矩阵。

1.3 数据处理

植物种的数据采用重要值作为综合指标。在每个样方内计算乔木、灌木和草本植物的重要值:

乔木重要值=(相对密度+相对高度+相对优势度)/300

灌木和草本重要值=(相对盖度+相对高度)/200

- (1)群落类型的多样性 采用 VESPAN 软件包中 HILL 设计的 TWINSpan。
- (2)群落的多样性测度 群落中所有乔、灌、草一起参与多样性计算,并结合加权参数对群落总体多样性进行测度:

$$D = W_1D_1 + W_2D_2 + W_3D_3$$

式中, D 表示群落的总体多样性指数; D_1 、 D_2 、 D_3 分别表示乔木层、灌木层和草本层的多样性指数; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为给定的乔木层、灌木层和草本层的权重系数,大小分别为 0.5、0.25、0.25。根据分类结果,在每一个群落类型中将所含的各样方多样性指数求平均值,即得到每个群落的多样性指数。

(3)物种多样性 采用丰富度指数、物种多样性指数、均匀度指数分析讨论。

丰富度指数 是指在一定大小的样方中的物种数目,不考虑种间个体数量,即忽略富集种和稀疏种以及对群落多样性贡献的差异^[2]:

$$R = S \quad R_1 = (S - 1)/\ln(N) \quad R_2 = S/\sqrt{N}$$

综合多样性指数 是对种的丰富度和均匀度两种涵义的结合,又称种的不齐性。二者合在一起实际上是强调了个体数目,因而又称为优势度多样性^[2]:

表 1 土壤因子的测定方法

Table 1 Measurements and instruments for soil factors			
土壤因子 Soil factors	采用的方法 Experiment methods	浓度范围 Concentration range	
		最大值 Max	最小值 Min
pH 值	电位法	8.02	7.65
全 N(%)	开氏定氮法	2971	156
全 P(%)	酸溶-钼锑抗比色法	428	143
电导率	电导法	141	63
有机质(%)	油浴加热 K ₂ Cr ₂ O ₇ 容量法	2.15	0.19
K(mg/kg)	原子吸收分光光度法	21932	3730
Cu(mg/kg)	原子吸收分光光度法	45	20
Zn(mg/kg)	原子吸收分光光度法	645	7.85
Mn(mg/kg)	原子吸收分光光度法	945	159

表 2 安太堡矿区植被恢复过程植物名录表

Table 2 List of species in the process of vegetation restoration of Antaibao mine

序号 Order number	物种 Species	序号 Order number	物种 Species
1	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	32	紫花地丁 <i>Viola yedoensis</i>
2	早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	33	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>
3	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	34	小蓟 <i>Cirsium setosum</i>
4	独行菜 <i>Lepidium apetalum</i>	35	草木樨 <i>Melilotus suaveolens</i>
5	车前 <i>Plantago asiatica</i>	36	千里光 <i>Senecio scandens</i>
6	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	37	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>
7	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	38	铁杆蒿 <i>Artemisia vestita</i>
8	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	39	板蓝根 <i>Isatis tinctoria</i>
9	百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	40	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>
10	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	41	碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>
11	披针苔草 <i>Carex lancedata</i> Boott.	42	西风古 <i>Amaranthus retroflexus</i>
12	风毛菊 <i>Saussurea japonica</i>	43	稗 <i>Echinochloa crusgallii</i>
13	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	44	紫草 <i>Lithospermum erythrorrhizon</i>
14	砂珍珠豆 <i>Oxytropis psammocharis</i>	45	小红菊 <i>Dendranthema chaneltii</i>
15	拂子茅 <i>Calamagrostis epigejos</i>	46	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>
16	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	47	珍珠梅 <i>Sorbaria kirilowii</i>
17	苦蕒菜 <i>Ixeris denticulata</i>	48	红花绣线菊 <i>Spiraea japonica</i>
18	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	49	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>
19	黄芥 <i>Brassica jucea</i>	50	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>
20	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	51	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>
21	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	52	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>
22	华黄芪 <i>Astragalus chinensis</i>	53	枸杞 <i>Lycium chinense</i>
23	阿尔泰紫菀 <i>Heteropappus altaicus</i>	54	白杆 <i>Picea meyeri</i>
24	山野豌豆 <i>Vicia amoena</i>	55	青杆 <i>Picea wilsonii</i>
25	牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	56	旱柳 <i>Salix matsudana</i>
26	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	57	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>
27	牛皮消 <i>Cynanchum auriculatum</i>	58	旱榆 <i>Ulmus pumila</i>
28	灰菜 <i>Chenopodium album</i>	59	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>
29	荠菜 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	60	小叶杨 <i>Populus simonii</i>
30	角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	61	新疆杨 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>
31	益母草 <i>Leonurus japonicus</i>		

$$\lambda = \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad H' = \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \quad N1 = e^{H'} \quad N2 = \frac{1}{\lambda}$$

均匀度指数 是指一个群落或生境中全部种的个体数目的分配情况,它反映了种属组成的均匀程度^[2]:

$$E1 = H' / \ln(S) \quad E2 = e^{H'} / S \quad E3 = e^{H'} / S \quad E4 = N_2 / N_1$$

式中,S 为每一样方中的物种总数;N 为 S 个种的全部重要值之和。

考虑到各计算的多样性指数的差异,将 63 个样方的 12 个多样性指数进行最大值标准化,即产生一个 12×63 的数据矩阵,结合最大值标准化后的环境因子数据矩阵,进行 DCCA 分析。

2 结果与分析

2.1 群落类型的多样性

对安太堡矿区经过自然恢复过程的复垦地人工植被进行了 TWINSpan 等级分类,并结合其生态意义将 63 个样方划分为 7 组,代表 7 个群落类型:

I. 刺槐+油松-柠条-冰草 (Ass. *Robinia pseudoacacia* + *Pinus tabulaeformis* - *Caragana korshinskii* - *Agropyron cristatum*)。该群落位于复垦地南排海拔 1360m,群落总盖度 80%~90%,复垦时间为 9a。该群落主要的栽培种为乔木种油松、刺槐,灌木种柠条以及草本层中的沙打旺和苜蓿等豆科牧草。

II. 刺槐-沙棘-茵陈蒿 (Ass. *Robinia pseudoacacia*- *Hippophae rhamnoides*- *Artemisia capillaris*)。该群落主要位于复垦地南排海拔 1380m 和西排海拔 1520m 平台,群落总盖度 60%~90%,复垦时间为 5~9a。其中刺槐和沙棘为主要栽培种。

III. 旱榆-沙枣-茵陈蒿 (Ass. *Ulmus pumila*- *Elaeagnus angustifolia* - *Artemisia capillaris*)。该群落位于复垦地南排海拔 1420m 平台和南排海拔 1500m 的斜坡,群落总盖度为 50%~95%,复垦时间为 9a。其中主要栽培种为旱榆和沙枣。

IV. 柠条-冰草+茵陈蒿 (Ass. *Caragana korshinskii*- *Agropyron cristatum*+ *Artemisia capillaris*)。该群落位于复垦地南排海拔 1450m 平台和西排海拔 1475m 平台,群落总盖度为 70%~80%,复垦时间为 9a。群落中有 20%的死沙棘,这主要是由于覆土较浅,煤矸石燃烧使地表温度升高,导致沙棘植株死亡。沙棘淘汰后,冰草侵入约占 20%。

V. 沙棘-披碱草 (Ass. *Hippophae rhamnoides*- *Elymus dahuricus*)。该群落以沙棘为主,据各个样方所含乔木和灌木的不同,又可人为的划分为 4 小群落,其中第 1 亚群落原是单一沙棘群落,由于虫害进行过砍伐,所以现在以沙棘幼苗为主,群落总盖度为 75%~80%,复垦时间为 8a;第 2 亚群落位于复垦地内排海拔 1435m 平台,为沙棘群落,总盖度为 70%~80%,复垦时间为 4a。第 3 亚群落位于西排海拔 1460m 平台,为复垦地旱柳、新疆杨试验区,群落总盖度为 70%,复垦时间为 6a;第 4 亚群落位于西排海拔 1460m 平台,为单一枸杞群落,群落总盖度为 50%,复垦时间为 6a。

VI. 沙枣+沙棘-黄芥 (Ass. *Elaeagnus angustifolia*+*Hippophae rhamnoides*-*Brassica jucea*)。该群落位于复垦地内排海拔 1435m 平台,群落总盖度 35%~80%,复垦时间表为 4a。

VII. 沙棘+沙枣-猪毛菜 (Ass. *Hippophae rhamnoides*+ *Elaeagnus angustifolia* - *Salsola collina*)。该群落位于复垦地内排海拔 1420m 平台和海拔 1435m 平台,群落总盖度为 15%~30%,复垦时间为 1~2a。

2.2 群落多样性

根据群落多样性的测度值,绘制成图,如图 1 所示,结合群落类型的多样性进行分析。

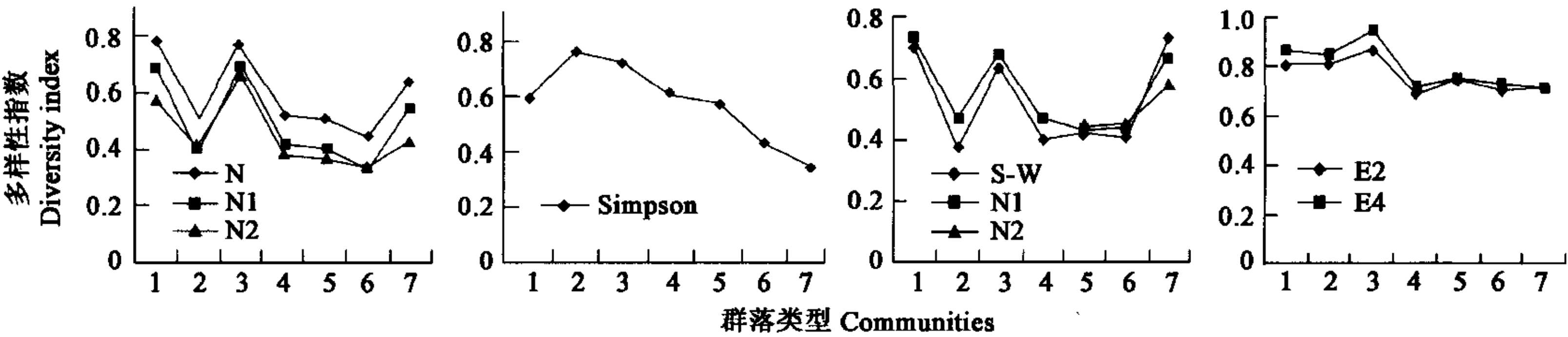


图 1 安太堡矿区 7 个植物群落的多样性

Fig. 1 The diversities of 7 communities in ATB Mts

森林群落中,群落 I、III 表现为多优势种群落,在结构层次上有良好的分化,可容纳各种生态型的植物生存;随植被恢复时间加长,侵入的动植物种类不断增加,从而多样性指数和丰富度指数较高,同时在植被恢复进程中,建群种和优势种的作用越来越明显,群落的均匀性降低。群落 II 表现为单优势种群落,群落中的单优势种群必然会排斥其它物种,使其在竞争中被淘汰,即该群落只是暂时可以抵抗外界的干扰,具有一定的稳定性,随着植被的恢复,必然会出现新的群落结构。事实上,矿区植物栽植的经验已证实了这一点,调查中,刺槐与沙棘混栽,沙棘竞争能力较刺槐弱,从而导致沙棘大片死亡的现象。

灌丛群落中,群落Ⅳ是人工栽植时间最长的群落,表现为较高的多样性指数和丰富度指数,但由于群落Ⅳ以柠条为单一优势种的群落,随时间的进一步推移,该群落有可能最终形成柠条占优势的干草原类型。群落Ⅴ为多优势种群落,灌木层中优势种沙棘与草本层中的优势种存在着竞争作用,且由于沙棘自身分蘖的小幼苗进一步加剧种内竞争,综合作用使得群落的稳定性变差。群落Ⅵ演替时间较短,丰富度和多样性指数偏小。群落Ⅶ因人工栽植时间较短,人为干扰因素大于因生境和种类组成反映在群落多样性指数上的变化规律。

总之,无论从物种丰富度指数还是从多样性指数看,灌丛群落各指数较森林群落显著偏低。在一定程度上说明了森林群落是较灌丛群落更适合当地特殊生境的群落配置方式。

根据不同群落的多样性指数,采用欧氏距离计算 7 个不同群落的相异系数并将其绘制成半矩阵图,结果如图 2 所示。从图中可以看森林群落中,群落Ⅰ、Ⅲ很相似,但它们与群落Ⅱ有较大的差异。灌丛群落中,各群落存在一定的差异性,但较森林群落内各群落差异性要小。森林群落与灌丛群落之间均表现为较大的相异系数。总的来说,相异系数与群落的多样性分析相一致。这些多样性指数又从群落的物种组成和群落结构上说明了群落类型的多样性。

2.3 物种多样性

2.3.1 DCCA 排序 本文以样方的多样性指数和环境因子为原始数据矩阵作 DCCA 排序图(见图 3),排序结果不仅反映样方之间多样性指数的相似性,而且反映样方多样性变化与环境因子组成的相互关系。本文在作 DCCA 与环境因子综合分析图时,将样方排序值作相应的缩小后,使得环境因子、样方排序值和中心值统一到中心位置,图中,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与植物群落的多样性变化的相关程度的大小。线越长,说明相关性越大,反之则越小。箭头连线与排序轴的夹角表示某个环境因子与排序轴之间相关性的 大小,夹角越小,相关性越大^[2]。从图中可以看出排序轴第 1 轴基本上反映了土壤水分的变化即 DCCA 第 1 轴从左到右,土壤水分逐渐增多;第 2 轴基本上反映了植被恢复的时间即从 DCCA 第 3 轴从下到上时间逐渐加长。DCCA 排序图的对角线基本上反映了植物群落多样性的变化,即从左下方到右上方,群落的综合多样性逐渐增大。

环境因子中,氮、磷、钾、海拔、铜、锌与第 1 轴的夹角较小,说明这些因子与群落间土壤水分的变化有一定的联系。有机质、时间和 pH 与第 2 轴的夹角小,特别是时间与第 2 轴的相关系数高达 0.83,进一步说明了第 2 轴反映了时间梯度。通过环境因子箭头长度可以看出时间和有机质是决定群落多样性变化规律的主要因素。海拔在排序图中的连线较上述二者偏小,这主要是因为矿区人工植被的栽植过程中,海拔高度与复垦时间并无直接关系,不象自然群落海拔对群落类型的分布有明显的影 响。同时还可以看出,多样性指数偏小的群落与锰关系密切,而多样性指数偏高的群落与有机质、时间的联系较为紧密。

在 DCCA 排序图上标定各群落在排序图中的位置,可以用看到植被恢复时间较长的群落Ⅰ、Ⅲ位于排序图的右端上方位,其次为时间稍次之的群落Ⅱ,而群落Ⅴ与群落Ⅵ则位于排序图的下方偏左的方位。考虑到群落Ⅶ受人为因素的影响较大,而未在排序图上标定。群落在排序图上的分布格局与群落多样性的分析结果相一致。

图 4 分别为选出的 4 个多样性指数在 DCCA 排序图中的分布格局,图中的数值表示多样性指数的变化等级(如表 3 所示)。从图中可以明显的看出各多样性指数的变化与环境因子之间的关系。物种丰富度指数与综合多样性指数变化趋势一致,而 Simpson 指数由于计算方法的不同决定了它与前二者变化趋势相反。均匀度指数也表现为与丰富度指数相反的趋势,但变化梯度不是很明显,从而很好的说明了综合多样性指数是丰富度指数和均匀度指数的综合反映,在丰富度指数显著增高而均匀度指数降低的情况下,综合多样性指数增大^[3]。从图还可以看出,丰富度指数和 Shaanon-Wiener 指数与时间、有机质、海拔和土壤中的锌、铜、氮、磷、钾表现为一致的变化趋势,这与群落多样性指数的研究相吻合,说明丰富度指数和 Shaanon-Wiener 指数与这些环境因子联系较为紧密。Simpson 指数则与锰和电导表现为一致的变化趋势,而与上述各因子表现这相反的趋势。均匀度指

1						
4.139	2					
0.378	4.312	3				
4.293	0.380	4.448	4			
4.123	1.328	4.235	1.043	5		
4.534	2.179	4.582	1.858	0.927	6	
4.761	6.319	4.451	6.203	5.514	5.044	7

图 2 7 个不同群落的相异系数矩阵图(欧氏距离)
Fig. 2 The dissimilarity matrix of 7 communities (Euclidean distance)

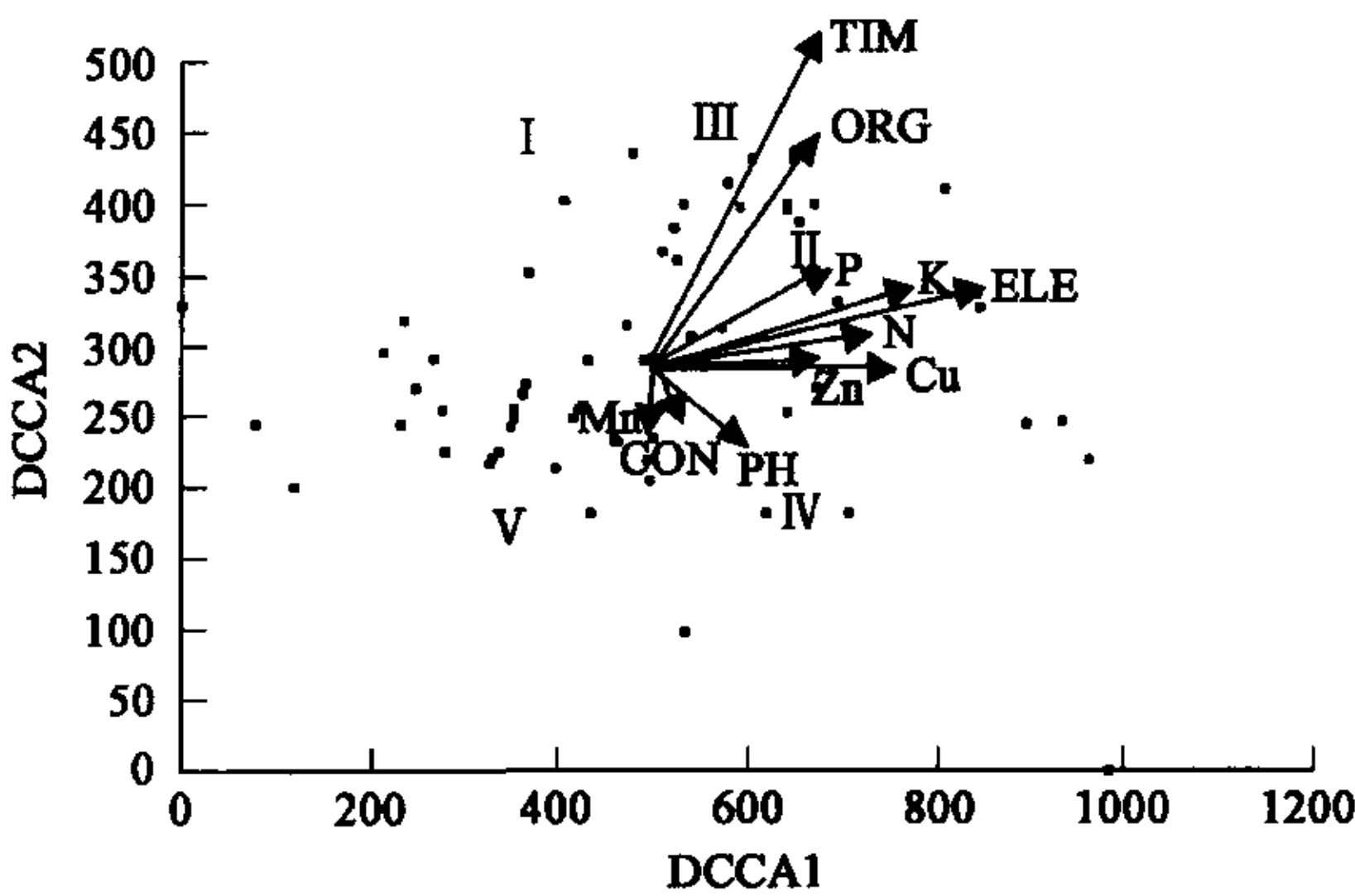


图 3 63 个样方的多样性指数与环境因子的 DCCA 排序图
Fig. 3 The DCCA ordination diagram of diversity indices of 63 quadrats and the environmental factors

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ表示不同群落类型的样方在排序图上排定的位置
Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ means sample locations of different communities on the ordination diagram

数与时间和土壤条件呈现一定的负相关关系,主要是由于随时间的变化和群落生境的改善,群落中优势种的作用越来越明显,这样群落中的均匀性必然降低^[4]。但降低梯度不明显,显然与安太堡矿区植被群落处于演替时间较短,群落处于演替进程中的实际情况相符合。

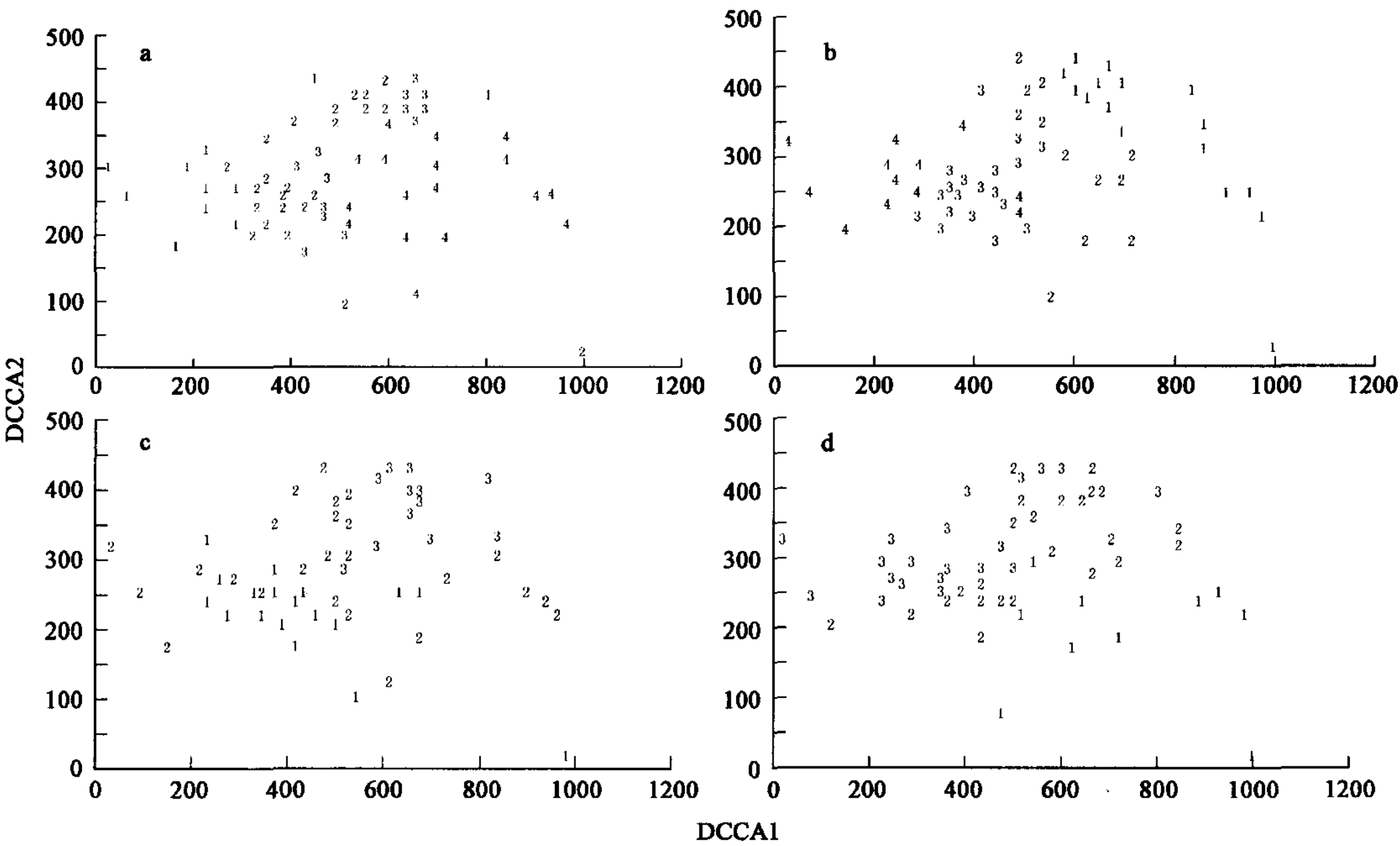


图 4 Patrick(a)、Simpson(b)、Shaanon-Wiener(c)、E4(d)指数在 DCCA 排序图上的分布格局
Fig. 4 The pattern of Patrick(a)、Simpson(b)、Shaanon-Wiener(c)、E4(d)indices on DCCA ordination diagram

表 3 多样性指数分级表

Table 3 The range of diversity indices shows on DCCA ordination diagram				
等级值 I Grade value	1	2	3	4
Patrick 指数	$0 < I \leq 0.45$	$0.45 < I \leq 0.55$	$0.55 < I \leq 0.65$	$0.65 < I \leq 1$
Simpson 指数	$0 < I \leq 0.4$	$0.4 < I \leq 0.6$	$0.6 < I \leq 0.7$	$0.7 < I \leq 1$
Shaanon-Wiener 指数	$0 < I \leq 0.35$	$0.35 < I \leq 0.6$	$0.6 < I \leq 1$	—
E4 指数	$0 < I \leq 0.7$	$0.7 < I \leq 0.9$	$0.9 < I \leq 1$	—

2.3.2 多元线性回归 表 4 为多样性指数与环境因子的多元线性回归,由回归方程可以看出两种回归方法得出的结论基本一致,从 F 和 R^2 值可以明显看出 Backward Regression 的回归效果要好于 Forward Regression。说明前者的拟合效果更好,精确度更高。从总的环境因子看出,时间、有机质与各多样性指数的相关性较大,另外锌与各多样性指数都呈表现为一定的相关。

从丰富度指数来看,有机质、时间、锰和锌与群落的丰富度指数相关性较大。从 Simpson 指数看,该指数与铜呈现正显著相关;从 Shaanon-Wiener 指数可以看出,锌相关性较大;而均匀度指数则受铜的影响较大。

有关土壤有机质与物种多样性的关系,多数人认为植物群落高的多样性出现在土壤养分梯度的中间位置,但 Gentry 在 1988 年提到,物种多样性最高的群落是在土壤最肥沃的地方^[5]。从上表的多元回归可以看出,物种的丰富度与土壤有机质呈一次线性关系,与 Gentry 的结果一致。而时间作为植物群落演替过程中的一个关键因素,与物种丰富度呈现双曲线关系,与传统研究结果相一致。土壤因子的氮、磷、钾 3 元素中,磷、钾与各多样性指数相关性不显著,说明这两种元素在安太堡矿区土壤中,含量较为充足,不会成为绿化种植过程中的限制因子。而氮与群落的均匀度呈现双曲线关系,说明群落的高均匀度出现在氮梯度变化的中间位置,同时也可以反映安太堡矿区天然土壤中是限制群落均匀度变化的显著因子。土壤中与多样性指数呈显著相关的因子,铜与均匀度指数呈现线性正相关,而锌则与综合多样性指数呈现线性正相关。

2.3.3 相关分析 从表 5 可以看出,锌、海拔与丰富度指数呈显著或极显著正相关, Simpson 指数与电导显著正相关,与海拔、铜显著负相关。Shaanon-Wiener 指数与综合多样性指数和海拔都呈显著或极显著正相关。均匀度指数则一致与铜表现为正显著相关。各种环境因子与植物作为一个系统而存在,其中各因子之间又相互影响、相互作用,任何一个因子的作用都不可能离开

其它因子而独立发挥作用。物种多样性与环境因子的关系有待于进一步研究。

表 4 群落多样性指数与环境因子的多元线性回归

Table 4 The multi-factors liner regression of community diversity indices and environmental factors			
	回归方程 Regression	R^2	F
R	$Y_1=0.25ORG+0.303Mn+1.461TIM^2-16.648TIM+75.055$	0.398	7.234 *
	$Y_2=-0.222ELE+0.412Zn+0.284Mn+57.165$	0.272	7.411 *
R1	$Y_1=0.25ORG+0.303Mn+0.468Zn+1.461TIM^2-16.648TIM+65.691$	0.398	7.411 *
	$Y_2=-0.28ELE+0.308Mn+0.526Zn+49.092$	0.334	9.716 *
R2	$Y_1=0.224ORG+0.0032Mn^2+0.0051Zn^2+0.71TIM^2-8.149TIM+51.237$	0.4	7.462 *
	$Y_2=0.0032Mn^2+0.0053Zn^2-0.146ELE+23.56$	0.36	10.854 **
λ	$Y_1=0.289ORG+0.349Cu+0.205ELE-0.0023TIM+32.838$	0.279	5.501 *
	$Y_2=0.356Cu+0.0023ELE^2+2.298TIM+20.374$	0.244	6.225 *
H'	$Y_1=0.485Zn-0.368ELE+0.0028Mn^2-2.858TIM+81.373$	0.387	9.007 *
	$Y_2=0.484Zn-0.0031ELE^2+0.291Mn^2-2.294TIM+64.575$	0.367	8.245 *
N1	$Y_1=0.211Cu+0.295Zn+1.167TIM^2-14.234TIM+79.943$	0.241	4.526
	$Y_2=-0.135ELE+60.816$	0.068	4.385
N2	$Y_1=0.235Cu+0.298Zn-0.172ELE+52.707$	0.15	3.406
	—	—	—
E2	$Y_1=0.399Cu+0.00295N^2+57.799$	0.161	5.678 *
	$Y_2=0.358Cu+60.49$	0.116	7.889 *
E4	$Y_1=0.436Cu+0.286Zn+0.0029N^2+56.847$	0.181	4.261
	$Y_2=0.0038Cu+69.867$	0.099	7.89 *

* Y_1 为 Backward Regression 回归方程; Y_2 为 Forward Regression 回归方程; * $\alpha=0.05$ 时显著; * * $\alpha=0.01$ 时显著 Y_1 :equation for back ward regression; Y_2 : equation for forward regression * significant as $\alpha=0.05$ * * Significant as $\alpha=0.01$

表 5 多样性指数与环境因子的相关系数

Table 5 The correlation coefficients of diversity indices and environmental factors											
	PH	CON	ORG	N	P	K	Cu	Mn	Zn	HB	TIM
R	0.081	0.106	0.18	-0.014	0.046	-0.104	0.052	0.164	0.262 *	0.293 *	0.11
R1	0.073	0.15	0.224	-0.029	0.044	-0.163	-0.05	0.138	0.307 *	0.337 **	0.188
R2	0.047	0.076	0.246	0.035	-0.04	-0.168	0.004	0.197	0.364 **	-0.234	0.197
λ	-0.133	0.315 *	0.11	0.116	0.019	0.223	-0.303 *	0.095	-0.042	-0.3 *	0.119
H'	0.196	0.242	-0.057	-0.027	-0.059	-0.2	-0.004	0.143	0.229	0.35 **	-0.215
N1	0.14	0.179	0.019	0.008	0.043	-0.083	0.14	0.183	0.17	0.26 *	-0.13
N2	0.105	0.066	0.08	0.09	-0.016	-0.101	0.143	0.144	0.128	0.234	-0.041
E2	0.028	-0.13	-0.055	0.114	-0.041	0.084	0.341 **	0.156	-0.009	0.126	-0.18
E4	0.031	-0.16	0.017	0.134	-0.038	0.091	0.301 *	0.148	0.073	0.107	-0.099

* 表示显著相关 means significant; * * 表示极显著相关 means very significant

3 讨论

- (1)通过群落多样性的分析可以看到,随安太堡矿区植被恢复过程的加长,群落的多样性呈上长趋势,根据物种多样性随演替而趋于增大,到演替后期,多样性又趋于减少^[6]。说明安太堡矿区植被演替处于中期阶段。
- (2)矿区植被重建的主要方式是通过直接种植植被演替后期的植物种来加速原始植被演替进程。从上述研究可以看到在人工配置的植物种在组成方面表现出差异,这种差异所造成的影响只表现在一个相对短的时期内^[9],在本研究区内这种作用只持续发生在植被恢复的前 3a 内。3a 之后群落的演替与自然植被的演替表现出趋同性。但这种人工植被的演替周期比自然植被的演替周期要短的多,矿区人工栽植的森林群落在恢复 9a 后群落总盖度高达 80%~90%。其中最典型的演替模式表现为:豆科牧草+灌木+乔木→喜阴禾本科+灌木+乔木→禾本科草本+阴性或阳性乔木。
- (3)在所选取的物种符合当地环境条件并各物种间具有相容生态特性的前提下,人工配置群落的物种多样性可能会影响到群落演替的进程^[10],从本文的研究结果看,多样的人工配置群落比单一的人工配置群落更能促进群落向正向演替的方向发展,至少是在现有的演替阶段对群落的发展起决定性的作用。这可能是造成森林群落能够适合安太堡矿区特殊生境的群落配置方式的原因之一。
- (4)物种多样性的分析表明制约安太堡矿区物种多样性变化的主要因素是土壤水分和演替时间。
- (5)多样性偏高的群落与有机质和时间联系较为紧密,而多样性偏低的群落则与锰的联系较为紧密。

(6)物种多样性与各环境因子的分析表明,锌与丰富度指数呈显著相关性,均匀度指数与铜表现为正显著相关性。

(7)群落均匀度指数的变化梯度较丰富度指数和综合多样性指数的变化为缓和。

(8)各物种多样性的研究方法比较表明,其结果都表现出一致的趋势。DCCA 排序可以对影响群落多样性变化的环境因子做粗略的分析。而多元线性回归和相关分析得出的是定量的结果,精确度更高,但后两种方法对于检验不显著的因子则无法得出结论。多元线性回归和相关分析相比较,可以看出,多元线性回归比相关分析研究的灵敏度更高,对于相关分析中不显著的因子,在多元线性回归中则表现出为显著性。多元线性回归中,Backward Regression 的效果比 Forward Regression 好。因而,在实际的分析过程中,将 3 种方法结合使用,效果更显著。

References:

- [1] Ma K P, Huang J H. Plant community diversity in Dongling mountain, Beijing, *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **9**(3):268~277.
- [2] Zhang J T. *Quantitative vegetation ecology*. Beijing: Science & Technology Press, 1995. 44~76.
- [3] Zhang J T, Chai B F. Changes in species diversity in the succession of plant communities of abandoned land in Luliang Mountain west Shanxi *Chinese biodiversity*, 2000, **8**(4):378~384.
- [4] Cheng T G. The study of diversity in Shenweigou of Guandi mountain, Shanxi Province. *Acta Bot. Boreal-Occident. Sin.*, 2000, **8**(4):638~646.
- [5] He J S, Ma K P. Species diversity. In: Jian Z. G. ed. *Conservation biology*. Hangzhon: Hangzhou Science and Technology Press, 1997. 20~33.
- [6] Guo Q B, Liu Y C. Dynamic of species diversity in secondary succession series of forest communities in Jinyun Mt. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(5):521~524.
- [7] Bai Z K, et al. *Land reclamation and ecological restoration in Pingshuo opencast mine area*. China Agriculture Press, 2000. 4.
- [8] Li J C, et al. *Land reclamation and ecological restoration in the area of surface coal Mine—the research and practices of Pingshuo*. Science Press, 2000. 5.
- [9] Van der Putten et W H. Plant species diversity as a diver of early succession in abandoned fields; a multi-site approach. *Oecologia*, 2000, **124**:91~99.
- [10] Reinhard F, Huttl, Edwin Weber. Forest ecosystem development in post-mining landscapes; a case study of the Lusatian Lignite district. *Naturwissenschaften*, 2001, **88**:322~329.
- [11] David Mouillot, Alain Lepretre. A comparison of species diversity estimators *Res. Popul. Ecol.*, 1999, **41**:203~215.
- [12] Maly S, Korthals G W et. Effect of vegetation manipulation of abandoned arable land on soil microbial perperties, *Biol. Fertil. Soils*, 2003, **31**:121~127

参考文献:

- [1] 马克平, 黄建辉, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究——丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 1995, **15**(3):268~277
- [2] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995:44~76.
- [3] 张金屯, 柴宝峰, 等. 晋西吕梁山严村撂荒地植物群落演替中的物种多样性的变化. *生物多样性*, 2000, **8**(4):378~384.
- [4] 陈廷贵, 张金屯, 上官铁梁, 等. 山西关帝山神尾沟植物群落多样性研究. *西北植物学报*, 2000, **20**(4):638~646.
- [5] 贺金生, 马克平. 物种多样性. 见: 蒋志刚. 保护生物学, 杭州: 浙江科学技术出版社. 1997:20~33.
- [6] 郭全邦, 刘玉成, 李旭光. 缙云山森林次生演替序列群落的物种多样性动态. *应用生态学报*, 1999, **10**(5):521~524.
- [7] 白中科, 等. 工矿区土地复垦与生态重建. 北京: 农业出版社, 2000, 4.
- [8] 李晋川, 等. 露天煤矿土地复垦与生态重建——平朔露天矿的研究与实践. 北京: 科学出版社, 2000. 5.