

管涔山撂荒地植物群落演替过程中物种多样性研究

刘秀珍¹, 张峰^{1,2*}, 张金屯^{1,3}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学生命科学与技术学院, 太原 030006;

3. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘要: 用 TWINSPAN 分类方法将管涔山撂荒地植物群落的演替过程划分为 7 群丛, 分别属于植被演替的 3 个阶段——草本群落阶段、灌丛群落阶段和森林群落阶段。用物种多样性指数分析了物种丰富度、均匀度、多样性和优势度的变化规律, 结果表明, 随着演替时间的延长, 物种丰富度和多样性有增加的趋势, 优势度、均匀度有降低的趋势。用 DCA 排序分析植物群落的结构、组成和生活型在演替过程中的变化规律, 表明随着群落环境条件的改善, 群落内物种的组成发生了很明显的变化, 最后发展为适应该区域环境条件的、以华北落叶松为建群种的、稳定的群落, 结果显示群落内物种组成愈丰富, 则多样性愈大。进一步用 DCA 排序分析物种多样性与海拔和时间之间的关系, 表明随着海拔的升高和时间的延长, 结论和前面一致——物种丰富度和多样性逐渐增加, 优势度、均匀度逐渐降低。

关键词: 撂荒地; DCA 排序; 物种多样性; 演替; TWINSPAN 分类

中图分类号: Q948.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2008)04-0391-06

Study on Species Diversity during the Succession of Plant Communities on Abandoned Farmlands in Guancen Mountains, Shanxi

LIU Xiu-Zhen¹, ZHANG Feng^{1,2*}, ZHANG Jin-Tun^{1,3}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. School of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The successive processes of plant communities were studied on abandoned farmlands in Guancen Mountain of Shanxi Province. Seven groups were divided by using TWINSPAN, representing seven associations and belonging to three vegetation succession stages separately — herbaceous communities stage, shrub communities stage and forest communities stage. The change regularity of the species richness, evenness, diversity and dominance were analyzed by using species diversity index. The results showed that the species richness and diversity were increasing, dominance and evenness were reducing with the succession time extending. The change regularity of composition, structure and life type of plant communities were analyzed by using DCA ordination. The results showed that the changes of plant communities were rapidness with environmental alteration during succession on abandoned farmlands and the forest community of *Larix principis-rupprechtii* turning into constructive species were formed in this area. It illustrated further that the richer species composition was, the higher species diversity was. The relationship of species diversity, elevation and abandoned time was analyzed further by using DCA, the conclusion was same with the foregoing tendency — species richness and diversity were increasing, dominance and evenness were reducing with elevation rising and the succession time extending.

Key words: Abandoned farmlands; DCA ordination; Species diversity; Succession; TWINSPAN classify

撂荒演替是植被次生演替的一个重要类型, 许多学者都对它进行了研究, 甚至一些重要的植物演替理论模式也是基于对撂荒地的观察与分析建立的。关于撂荒演替中的演替序列^[1~3]、植被种类组成^[1~5]等均有报道^[6], 其中在长期弃耕地上得到的

永久性恢复植被已经成为群落演替生态学研究成功的范例^[7]。但以往的研究主要集中在人工植被恢复方面, 如植树造林技术研究、人工恢复过程的土壤性质变化、人工林地土壤肥力评价等方面^[8], 而对撂荒地演替过程中物种多样性变化的研究资料非常

收稿日期: 2007-12-06, 修回日期: 2008-03-13。

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2006011077); 山西省留学基金(20060024)资助。

作者简介: 刘秀珍(1969-), 女, 山西夏县人, 博士研究生, 主要从事数量生态学和植被生态学研究。

* 通讯作者(Author for correspondence). E-mail: fzhang@sxu.edu.cn。

有限^[9]。

近年来国家大力提倡退耕还林、还草,促进植被的自我修复,这无疑是管涔山生态恢复的一个重要机遇。对管涔山撂荒地植物群落演替过程中物种多样性进行研究,为维护当地生态平衡、保护生物多样性和促进山西省的国民经济建设有着非常重要的现实和长远的意义。我们用物种多样性指数、TWINSPAN 分类和 DCA 排序分析了撂荒地上植物群落演替过程中的物种丰富度、均匀度、多样性、优势度以及群落结构的变化规律,以揭示生物多样性的时空变化特征及其生态学意义,为评估弃耕措施在当地及山西乃至黄土高原其它地方的实施提供科学依据。

1 研究地自然状况

研究地位于山西省宁武县境内,属于管涔山的一部分,处于 $38^{\circ}57'23'' \sim 39^{\circ}03'42''N$, $112^{\circ}36'18'' \sim 112^{\circ}37'25''E$, 海拔 $1570 \sim 2450\text{ m}$, 年平均气温 $6 \sim 7^{\circ}\text{C}$, 1 月均温 -10°C 左右, 7 月均温 $20 \sim 21^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $450 \sim 500\text{ mm}$, 土壤类型是山地褐土、棕壤。植被类型属于暖温带落叶阔叶林^[10], 包括白桦林 (Form. *Betula platyphylla*)、山杨林 (Form. *Populus davidiana*)、华北落叶松林 (Form. *Larix principis-rupprechtii*)^[11], 还有青杆林 (Form. *Picea wilsonii*) 和白杆林 (Form. *Picea meyeri*)。由于人为因素的干扰, 原始植被类型已不复存在。

2 研究方法

2.1 样方调查

应用空间序列代替时间序列,采用随机抽样方法进行野外调查。在宁武县的余庄乡,对附近的低中山撂荒地群落进行了随机取样,记录了 39 个样方,共 91 个种,它们代表着植物群落恢复演替的不同阶段。弃耕撂荒约有 1 ~ 30 年左右,撂荒年限是通过树木年轮和访问当地居民获得。森林群落的样方面积 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 12 个样方;灌丛样方面积 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, 12 个样方;草本植物群落为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 15 个样方。记录内容包括植物种类、高度、盖度、胸径等。同时记录各群落的综合特征和生境特征,包括群落总盖度、各个层片的盖度、层间植物种类、枯枝落叶层厚度、海拔、坡度、坡向、退耕时间、人类活动干扰情况等。

2.2 数据处理

物种多样性全部采用重要值来计算:

乔木重要值 =

$$(\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对优势度}) / 300;$$

$$\text{灌木重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 200;$$

$$\text{草本重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 200.$$

2.3 数据分析

2.3.1 多样性指数计算

丰富度指数、均匀度指数、多样性指数^[8,12,13]和优势度指数计算公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数(1958):

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

Patrick 丰富度指数(1949): $R = S$ (2)

Simpson 优势度指数: $D = \sum N_i^2$ (3)

Pielon 均匀度指数(1975): $E_1 = \frac{H'}{\ln(S)}$ (4)

Alatalo 均匀度指数(1981): $E_5 = \frac{N_2 - 1}{N_1 - 1}$ (5)

上式(1)~(5)中, S 为每一样方的物种总数; N 是 S 个种的全部重要值之和; N_i 是第 i 个种的重要值。

2.3.2 TWINSPAN 分类

TWINSPAN^[14,15]把 39 个样方分为 3 大类 7 小类,根据中国植被分类方法,它们分别属于不同演替阶段的群落类型^[10,11]。

2.3.3 DCA 分析

对演替不同阶段的多样性指数和物种进行 DCA^[14,16]分析,揭示物种多样性与演替阶段以及和不同环境因子之间的关系。根据植被生态学和数量分类方法的要求,把频度 $\leq 5\%$ 的物种剔除,特选出具有代表性的 38 个物种进行研究,并作分析。

3 结果与分析

3.1 植被演替阶段的分类

3.1.1 草本群落阶段

这个阶段起始于弃耕之时,在这个过程中,环境条件较差,群落变化的速度很快,物种组成很不稳定,包括:

I. 铁杆蒿 + 茵陈蒿 + 狗尾草群丛 (Ass. *Artemisia sacrorum* + *Artemisia capillaris* + *Setaria viridis*), 包括样方 21、25、26、31 和 37。

II. 铁杆蒿 + 早熟禾 + 铺地蓼陵菜群丛 (Ass. *Artemisia sacrorum* + *Poa annua* + *Potentilla supina*), 包括样方 20、22、27、32 和 39。

III. 茵陈蒿 + 山西马先蒿 + 披碱草群丛 (Ass. *Artemisia capillaris* + *Pedicularis shansiensis* + *Elymus*

dahuricus),包括样方19、23、29、30、33和38。

3.1.2 灌丛群落阶段

灌丛群落阶段是群落演替到一定阶段的产物,一般在弃耕15年开始萌芽,20~25年后可形成灌木群落,25~30年能达到较稳定的成熟灌丛群落^[9]。这一阶段物种变化十分明显,层次结构逐步形成,包括:

IV. 沙棘-铁杆蒿+隐子草群丛(*Ass. Hippophae rhamnoides*-*Artemisia sacrorum*+*Cleistogenes serotina*),包括样方11和16。

V. 沙棘+虎榛子-铁杆蒿群丛(*Ass. Hippophae rhamnoides*+*Ostryopsis davidia*-*Artemisia sacrorum*),包括样方1、2、3、5、6、8、10、18和28。

3.1.3 森林群落阶段

在黄土高原自然演替条件下,森林群落是由灌木群落发展而来的。一般在弃耕后30~50年开始形成森林群落,森林群落一旦形成,则较为稳定^[9]。包括:

VI. 华北落叶松-沙棘-铁杆蒿群丛(*Ass. Larix principis-rupprechtii*-*Hippophae rhamnoides*-*Artemisia sacrorum*),包括样方9、12、13、14、15和17。

VII. 华北落叶松+山杨-柠条-铁杆蒿群丛(*Ass. Larix principis-rupprechtii*+*Populus davidiana*-*Caragana korshinskii*-*Artemisia sacrorum*),包括样方4、7、24、34、35和36。

3.2 不同演替阶段物种多样性指数的比较及方差分析

物种多样性是群落生物组成结构的重要指标,物种丰富度和均匀度与物种多样性密切相关。群落内物种组成愈丰富,则多样性愈大^[17]。多样性指数是物种水平上群落多样性和异质性程度的度量,能够综合反映群落物种多样性和各种间个体分布的均匀程度^[18]。

从表1可以看出各个演替阶段多样性指数的变

化规律。从草本群落阶段—灌丛群落阶段—森林群落阶段的Shannon-Wiener多样性指数H'和Patrick丰富度指数随着演替时间的延长有先升后降的趋势,而在灌丛群落阶段这两种指数最大,说明了在该地植物群落演替的过程中,灌丛群落阶段群落内物种最为丰富,物种之间的竞争也最为激烈,结果使群落反而变得不稳定。随着演替的进行,群落内物种数量逐渐增加,群落结构也趋于复杂化,因此,物种丰富度显著提高^[19,20]。在撂荒地演替的初始阶段,群落的生态环境条件较差,主要是少数杂类草的出现,随后种类增多,发展为较茂密的杂类草植物群落,随着群落生长环境条件的逐渐改善,灌木种和乔木种不断出现,并逐渐发展为优势种,使群落层次分化明显,结构复杂,可容纳各类生态型植物生存,因此,丰富度越来越大^[8]。方差检验显示H'和Patrick指数呈现极显著(F=13.630,p=0.000和F=31.869,p=0.000),表明它们反映灵敏,能够指示植物群落在演替过程中多样性和丰富度的变化。

在弃耕演替过程中,随着群落组成的变化,群落内不同物种所起的作用和地位发生变化,优势度指数也发生着相应的变化。在演替初期,群落的生态环境较差,一年生草本植物迅速侵入,使演替初期群落具有较高的生态优势度,但在随后的演替中,群落的优势度减小,群落内物种的优势地位逐渐减弱,优势种逐渐变得不明显,物种越多,这种效果越明显。Simpson优势度指数反映群落内不同物种所起的作用和所占的地位^[18],同物种多样性相反。从表1中可以看出,优势度指数随着演替时间的延长有降低的趋势,说明了群落内物种的组成结构发生变化,某个物种的优势地位不再显得突出,各个物种分享群落内的环境资源也趋于平衡,进一步说明群落正向适应当地环境条件的稳定状态发展,这正符合演替的规律。方差分析后,F=6.795,p=0.000呈极显著,说明它具有一定的代表性。

表1 不同演替阶段物种多样性指数变化及方差分析

Table 1 The change of species diversity indices and the ANOVA analysis in different succession stages

多样性指数 Diversity indices	草本群落阶段 Herbaceous community stage			灌丛群落阶段 Shrub community stage		森林群落阶段 Forest community stage		F	p
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
H'	0.9753	1.2775	1.7852	2.3599	2.3161	2.2154	2.2528	13.630 **	0.000
Patrick	3	4	8	16	18	16	15	31.869 **	0.000
Simpson	0.4244	0.2928	0.2211	0.1158	0.1447	0.1519	0.1481	6.795 **	0.000
E ₁	0.8467	0.9307	0.8438	0.8806	0.8429	0.8014	0.8265	0.870	0.528
E ₅	0.8565	0.9483	0.8505	0.8530	0.7088	0.6844	0.7292	3.079 *	0.035

** p < 0.01; * 0.01 < p < 0.05.

均匀度指群落内种的相对密度。从表 1 中可以看出,均匀度指数 E_1 和 E_5 在演替的 3 个阶段中,数值都比较大,但总的趋势是降低。这说明了在撂荒地植被演替的初期阶段,物种较少,各种植物在群落中竞争不强烈,资源分配较均匀,但随着演替时间的延长,群落内的物种数逐渐增多(从 3 种到 18 种再到 15 种),群落的组成和结构发生改变[从草本植物(如铁杆蒿)到灌木物种(如沙棘)再到乔木物种(华北落叶松)的出现],优势种也发生改变,种间竞争变得激烈,群落出现分层现象,物种对资源的利用更趋于合理,群落最终是向着稳定的演替方向发展。方差检验结果显示 E_5 显著而 E_1 不显著,说明这两个指数也能反映植物群落在演替过程中均匀度的变化情况。结果不同,可能是与其计算方法不同有关。

3.3 不同演替阶段物种变化的 DCA 排序分析

群落组成和结构发生改变,也必然对群落的物种多样性产生影响。由于研究区域是撂荒地带,随着演替的进行,物种的种类会发生频繁的变化,图 1 是 38 个物种的 DCA 二维排序图,被划分为 5 个区域,分别属于 3 个不同的演替阶段。

DCA 的横轴基本上反映了植物群落所在环境与海拔和时间演替的关系,从 A 区到 E 区海拔由低到高,撂荒时间由短到长,说明了随着海拔的升高,时间的变化,植物群落的类型由草本植被—灌丛—森林的演替变化规律。纵轴反映了植物群落所在环境的水分梯度变化,从下向上,水分依次增大,植物群落由灌木群落向森林群落演变。如图 1 D 区中的标号 6,它是灌木物种虎榛子,生于山坡杂木林或松

林下,海拔 1500~1600 m,E 区中的 1 号物种是华北落叶松,强阳性树,性极耐寒,对土壤的适应性强,喜深厚湿润而排水良好的酸性或中性土壤,海拔为 2400 m。由不同植物种类,可以判断出 DCA 的纵轴反映了植物群落与土壤水分含量的关系,说明了环境水分含量的大小也是影响物种多样性的一个不可忽视的因子。

A、B、C 区是草本植物区,它们属于演替的初期阶段——草本群落阶段。包括狗尾草、车前(*Plantago*)、早熟禾、铁杆蒿、裂叶蒿(*Artemisia tanacetifolia*)、披碱草、黄芩(*Scutellaria baicalensis*)、山西马先蒿、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等物种。D 区是灌木区,属于演替的灌丛群落阶段,主要物种有沙棘、虎榛子,还伴随着其它草本植物如香茅(*Hierochloe odorata*)、隐子草、苔草(*Carex* sp.)等;E 区是乔木物种区,属于演替的高级阶段——森林群落阶段,群落内的优势种发生了明显的变化,并且出现很明显的分层现象。乔木树种华北落叶松成为该群落的优势种,还有其它的伴生物种如山杨、白桦等,灌木层有沙棘、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等物种,草本层有铁杆蒿、狗尾草等植物的生长。

由此分析可以看出:随着演替时间的延长,群落内的物种组成发生了明显的改变,从一些耐旱的草本植物群落演变为较茂密的杂类草植物群落;随着群落生长环境条件的逐渐改善,灌木种和乔木种不断出现,并逐渐发展为优势种,使群落层次分化明显,结构复杂,可容纳各类生态型植物生存,因此,丰富度越来越大^[19],物种多样性也就越来越高。这与前面物种多样性分析的结果相吻合。

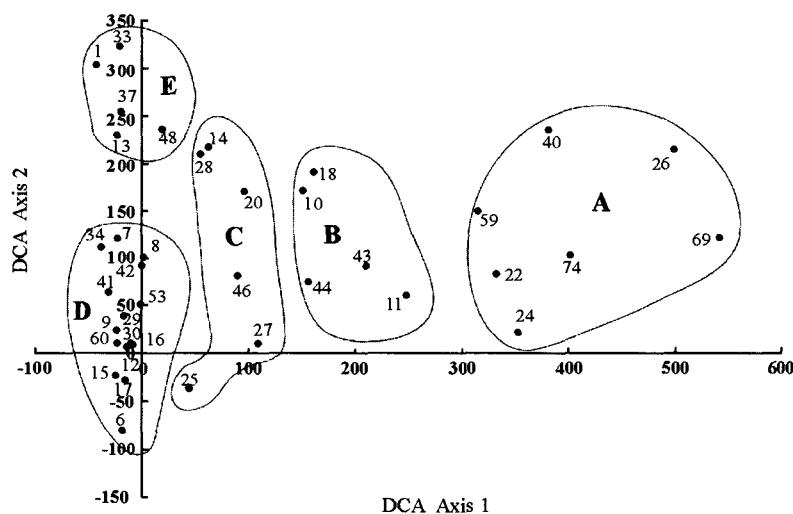


图 1 38 个物种的 DCA 二维排序图
Fig. 1 Two dimensional ordination diagram of 38 species by DCA

3.4 物种多样性指数与 DCA 第一轴的关系

图2中,X轴是DCA的第一轴,反映了植物群落随着演替过程的进行,不同多样性指数与海拔和时间的关系。从右向左海拔逐渐增高,演替的时间也逐渐延长,Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数随着海拔的升高而增加,说明了随着弃耕时间的延长,植物群落中物种的结构发生了变化,丰富度指数和多样性指数都在增加,而均匀度指数 E_1 和 Alatalo 变化的总趋势是降低,这与前面分析的结果是一样的。虽然二者也有少许的差异,这可能与二者的计算方法不同有关。Simpson 优势度指数随着演替时间的延长、海拔的升高而降低,这也和前面的分析结果相吻合。

这就进一步说明了 DCA 排序不仅能够很好地反映组成群落的物种不同,而且还能够反映随着演替的进行,环境因子的作用不同,群落的类型也在发生着变化,进一步反映出群落的不同种群生态适应的分布规律和生态更新的过程。

4 讨论与结论

物种多样性作为植被群落演替的重要特征之一,受到多种因素的影响,如物种种类及其数量、物种空间分布情况、不同环境因子等。近几年来这方面研究逐渐增多,用得多的一般都是 Shannon-wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数、Pielon 均匀度指数和 Simpson 优势度指数。根据研究目的、条

件的不同,其结果也就不同。例如张晓辉等^[21]对黄龙山林区主要森林群落下物种多样性进行研究,结果表明灌木层的多样性指数、丰富度指数和均匀度指数均高于草本层,且黄龙山阳坡是水热组合适合灌草层的发育。郝文芳等^[8]对黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中物种多样性研究结果显示:弃耕地的多样性指数、均匀度指数、丰富度指数在演替进行到9年时达到最高值,9~40年呈波浪式的降低趋势等等。本研究虽然也用这几个指数来研究撂荒地植物群落演替过程中物种多样性,但是从不同的角度来进行的。结果显示,随着演替时间的延长、海拔的升高,物种丰富度和多样性有增加的趋势,优势度、均匀度有降低的趋势,DCA 排序进一步说明了这种趋势。用方差分析来检验这几个指数的灵敏程度,结果表明 H' 、Patrick、Simpson 指数均呈现极显著, E_1 显著,说明这几个指数对研究该地区的物种多样性有着积极的指示作用。虽然均匀度指数 E_1 不显著,这可能与其计算方法不同有关。但总的来说,本研究所选用的多样性指数都比较适合研究该地区的物种多样性变化。

植被恢复是黄土高原生态环境建设的核心,长期以来一直受到各级政府部门和科研机构的高度重视,科研人员已在不同方面进行了大量的研究,如植被建设的理论与技术研究、植被效益研究等。这些植被恢复实践和研究工作,为该区植被恢复与重建

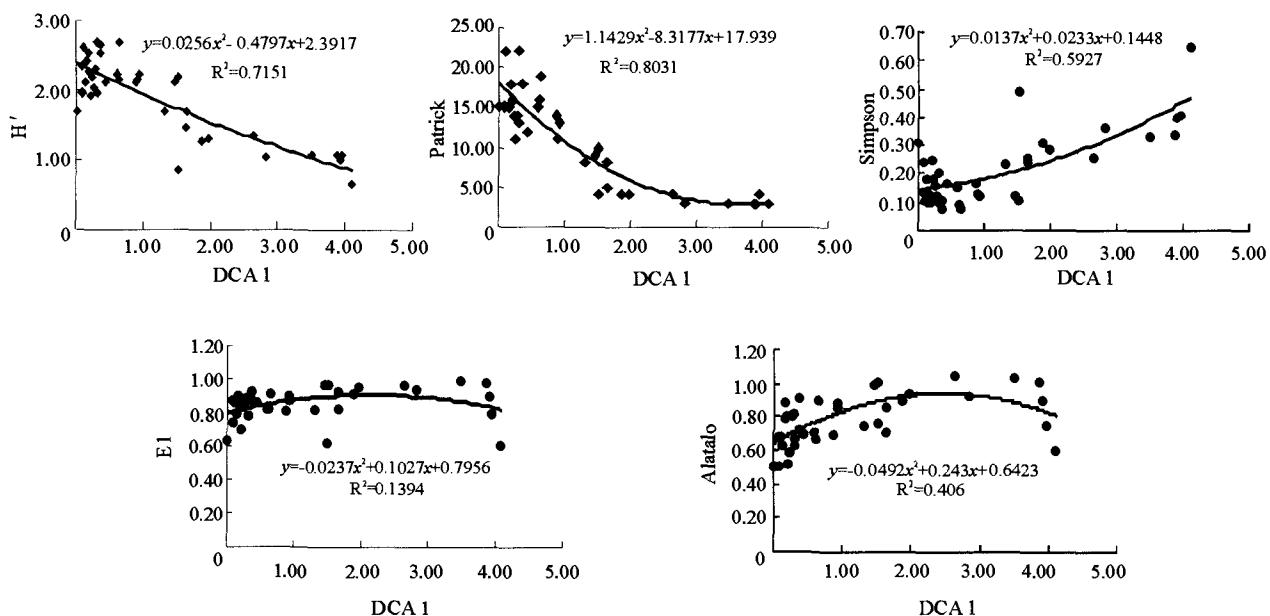


图2 物种多样性指数与 DCA 第一轴的关系
Fig. 2 The relationship of species diversity index and DCA Axis 1

提供了积极的指导作用,而对植被的自然恢复演替研究较少,特别是对撂荒地植物群落演替过程中物种多样性的研究就更不多见。通过实地调查,针对管涔山撂荒地的特殊情况(属于梯田种植模式),对该地区植物群落演替过程中物种多样性进行研究分析,得到以下结论:

(1) 随着演替时间的延长,群落内物种数量逐渐增加,群落结构也趋于复杂化,Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和 Patrick 丰富度指数呈现先上后降的趋势,Simpson 优势度指数、均匀度指数 E_1 和 E_5 均呈降低的趋势。

(2) 用 DCA 排序分析得出,在演替过程中群落物种组成和结构发生变化的规律,说明了以华北落叶松为建群种的森林群落是该区域演替的顶级群落。用 DCA 排序进一步分析物种多样性的变化规律,结果说明了丰富度越大,物种多样性也就越高。

(3) 管涔山属于黄土高原的一部分,而黄土高原是一个有着严峻生态问题的特殊的地理单元,在这个区域进行可持续发展,植被的恢复和重建是一条重要的途径。通过本文研究分析,说明在植被恢复期间,既要遵循演替规律,又要发挥我们人类的能动作用,可选择当地的乡土物种,通过人为调空,改变物种多样性和丰富度,以达到快速恢复植被的目的,这对当地生态平衡、物种多样性的保护和经济建设都具有重要的现实和指导作用,而权威的研究和长期的调查^[22]还有待进行。

参考文献:

- [1] 程积民. 黄土区植被的演替[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(5): 58-60.
- [2] 单保庆, 王刚. 草海水生植被演替系列的数量研究[J]. 草业学报, 1998, 7(2): 23-33.
- [3] 杜国祯, 王刚. 亚高山草甸弃耕地群落演替的数量分析与排序[J]. 草业学报, 1990, 1(1): 108-116.
- [4] 许庆方, 董宽虎, 史书瑞, 刘锐, 张小明, 李胜和. 放牧利用白羊草灌丛草地的植被特征[J]. 草地学报, 2004, 12(2): 136-139.
- [5] 杨利民, 韩梅, 李建东. 松嫩平原主要草地群落放牧退化演替阶段的划分[J]. 草地学报, 1996, 4(4): 281-287.
- [6] 杜峰, 山仑, 陈小燕, 梁宗锁. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究——撂荒演替序列[J]. 草地学报, 2005, 13(4): 328-333.
- [7] Van der Putten. Vegetation succession and herbivory along a salt marsh: changes induced by sea level rise and silt deposition along an elevational gradient [J]. *J Ecol*, 2000(85): 799-814.
- [8] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 唐龙. 黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究[J]. 草业科学, 2005, 22(9): 1-8.
- [9] 贺金生, 陈伟烈. 中国亚热带地区退化生态系统: 类型、分布、结构及恢复途径[A]. 见: 陈灵芝, 陈伟烈, 韩兴国编著. 中国退化生态系统研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 61-93.
- [10] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 453-615.
- [11] 张金屯. 管涔山主要植被类型及其合理利用问题[J]. 武汉植物学研究, 1987, 5(4): 373-382.
- [12] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [13] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II. α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [14] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 210-255.
- [15] Hill M O. TWINSPAN-A Fortran Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes[M]. Ithaca: Cornell University, 1979. 99-151.
- [16] Braak C J F Ter. CONOCO-A Fortran Program for Canonical Community Ordination by Detrended Canonical Correspondence Analysis[M]. Wageningen: Agro Mathe Group, 1991. 20-39.
- [17] 郑师章, 吴千红, 陶芸, 王海波. 普通生态学方法与原理[M]. 北京: 复旦大学出版社, 1994. 160-166.
- [18] 白永飞, 许志信, 李德斯. 内蒙古高原针茅草原群落多样性研究[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 353-360.
- [19] 陈廷贵, 张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究 I. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(5): 406-411.
- [20] 张金屯, 柴宝峰, 邱扬, 陈廷贵. 晋西吕梁山严村流域撂荒地植物群落演替中的物种多样性变化[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 378-384.
- [21] 张晓辉, 周建云, 何景峰, 卢彦昌, 张文辉. 黄龙山林区主要森林群落下物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 39-44.
- [22] Zhang J T. Succession analysis of plant communities in abandoned croplands in the eastern Loess Plateau of China[J]. *J Arid Environ*, 2005(63): 458-474.