

基于 DCCA 的蓟县八仙山土壤种子库特征分析

贺梦璇¹, 莫训强², 李洪远¹

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津师范大学 城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要: [目的] 通过研究天津市蓟县八仙山土壤种子库特征, 为土壤种子库应用于植被恢复提供参考。[方法] 采用除趋势典范对应分析(DCCA)方法探究土壤种子库与环境因子的关系。[结果] (1) 相比天津市其他样地, 蓟县八仙山土壤种子库萌发物种丰富度较高, 物种高达 42 种, 但土壤种子库密度却最低, 这与岩石裸露, 土层薄弱, 动物取食效应明显有很大关系; (2) 土壤种子库的 Sorensen 相似性指数较低, 但 Simpson 生态优势度指数、Shannon—Wiener 多样性指数和 Pielow 均匀度指数却较高; (3) 随着海拔逐渐升高, 群落结构明显变化, 木本植物数量增多。随着坡向逐渐向阳, 植被类型由喜阴植物逐渐变成向阳植物。[结论] 通过 DCCA 分析, 土壤种子库物种呈现明显的 3 个聚类。影响土壤种子库主要的土壤因子为有机质、pH 值和全磷。

关键词: 除趋势典范对应分析; 八仙山; 土壤种子库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0325-06

中图分类号: Q142.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.065

Analysis of Soil Seed Bank Characteristics in Baxian Mountain of Jixian County Based on Detrended Canonical Correspondence Analysis

HE Mengxuan¹, MO Xunqiang², LI Hongyuan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. College of Urban and Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: [Objective] To study the characteristics of soil seed bank (SSB) in Baxian Mountain in Jingxian County of Tianjin City in order to provide reference for vegetation restoration using SSB. [Methods] As a new correspondence analysis method, the detrended canonical correspondence analysis (DCCA) method can overcome the arch effect and give better explanation between plant communities and environmental factors. [Results] (1) Compared with other plots of Tianjin City, the species richness of SSB was very high, reaching to 42 species, but the density of SSB was the lowest. The bare rock, thin soil and obvious animal feeding effect were main reasons for the low density. (2) The Sorensen similarity index was very low, but the Shannon—Wiener diversity index, the Simpson index and the Pielow index were very high. (3) With the increase of the altitude, the community structure changed rapidly, the number of woody plants increased. With the slope exposing to the sun, the type of plants changed from shade plants to light plants. [Conclusion] By DCCA analysis, three obvious clusterings were presented. Organic matter, pH value and total phosphorus were main soil factors which affected the distribution of SSB.

Keywords: detrended canonical correspondence analysis; Baxian Mountain; soil seed bank

除趋势典范对应分析 (detrended canonical correspondence analysis, DCCA) 是在典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)^[1] 和除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 的基础上发展而来的植被环境关系多元分析技术。DCCA 分析技术将植被因子和环境因子相结

合, 很好地表达植被因子在环境因子梯度上的变化, 它能够克服弓形效应, 同时排序轴包含了环境因子的信息, 使研究结果更加精确^[2]。

目前在生态学领域, DCCA 排序分析已经得到了许多成功的应用。邱扬^[3]、余伟莅^[4]、索安宁^[5] 等分别应用 DCCA 分析对关帝山八水沟、浑善达克沙地、

收稿日期: 2013-11-12

修回日期: 2014-05-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同生境下城市绿化树种 VOCs 排放影响机制及估算模型研究”(31370700); 国家自然科学基金项目“低碳理念下基于人工智能的城市空间结构热岛效应模拟预测”(51278330)

第一作者: 贺梦璇(1989—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士研究生, 研究方向为环境管理。E-mail: hemengxuannku@126.com。

通信作者: 李洪远(1963—), 男(汉族), 天津市武清区人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: eialee@nankai.edu.cn。

黄土高原的植物群落与环境因子进行了排序分析,并取得了良好的效果。张金屯等^[6]通过分析比较,建议在排序分析中最好使用DCCA分析。

蓟县八仙山自然保护区是华北地区典型的以次生森林生态系统为保护对象的保护区,是中国北方罕见、完整的暖温带落叶阔叶林森林生态系统。保护区内乔木、灌木、草本、苔藓植物分层明显,植物种类繁多,群落结构相当稳定。韩英兰等^[7]对蓟县八仙山木本植物区系进行研究,发现该区域范围虽小,但是地理成分复杂,与世界区系有广泛的联系,以北温带分布为主。

土壤种子库是指存在于土壤表层凋落物和土壤中全部活性种子的总和^[8]。土壤种子库来源于地面植被,能够反映地面植被的历史情况^[9]。作为“潜种群阶段”,它具有潜在的植被恢复能力,是进行生态恢复非常重要的重要手段^[10]。关于蓟县八仙山土壤种子库的研究目前处于空白状态,因此通过DCCA分析方法对土壤种子库的特征进行研究将具有前瞻性意义,可以为今后土壤种子库应用于植被恢复提供非常重要的参考依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

八仙山国家级自然保护区位于天津蓟县境内,距蓟县城东北 30 km,地处北京、天津、唐山、承德 4 市之腹心,面积 1 049 hm²,暖温带大陆性季风气候,年平均温度为 10.1 ℃,年平均降水量为 680~750 mm。八仙山是天津市地势最高,群峰汇聚的地区,一般海拔为 500~800 m,900 m 以上的山峰有 19 座,其中八仙山主峰聚峰山海拔 1 046.8 m。地形以山地为主,是长城系的石英岩,土壤有机物含量较低;土壤类型主要为褐土和棕色森林土,土层贫瘠且含砾石较多。保护区内植被丰富,经初步统计,保护区共有维管束植物 92 科,270 属,413 种。其中蕨类植物 19 种,裸子植物 2 种,被子植物 392 种。

1.2 调查与取样

土壤种子库的采样于 2011 年 3 月进行。选取有代表性的小样方,面积为 1 m×1 m,样方设置充分考虑海拔、坡向等生境因子的变化。每个小样方内用取土环刀(直径 52 mm)钻土取样,样品装入塑料袋封口保存,每个样方 3 个重复,共 300 个样品带回实验室进行萌发试验。同时,在调查区域内随机选取 10 个 20 m×20 m 的样方,调查并记录其中的植物种类、数量、高度、盖度等。

1.3 萌发试验及样品分析

萌发法是测定土壤种子库中有活力种子种类和数量最常用的方法^[11]。研究所用的实验大棚规格为 3 m×10 m,60 目纱窗以防止其他植物种子进入试验区造成干扰。取新河沙土经高温消毒以杀死可能存在的种子后铺成苗床(厚度 2 cm),在实验大棚内进行萌发实验。采用自然光照,经常洒水以保持土壤湿润。

环境因子既包括生境因子也包括土壤理化因子。其中土壤理化因子的测定参照《土壤理化分析》^[12],而生境因子中,海拔高度用 GPS 在样方中央测定,坡向是以朝东为起点(即为 0°),顺时针旋转的角度表示。数据处理时采用 45°为一个区间划分等级制的方法,以数字表示各个等级,1 表示北坡,2 表示东北坡,3 表示西北坡,4 表示东坡,5 表示西坡,6 表示东南坡,7 表示西南坡,8 表示南坡。数字越大,越向阳。

1.4 数据处理

土壤种子库的密度用单位面积土壤中所包含的活性种子的数量来表示。土壤种子库的其他特征用 Simpson 生态优势度指数(D),Shannon—Wiener 多样性指数(H)和 Pielow 均匀度指数(E)以及土壤种子库与地面植被的 Sorensen 相似性系数(SC)来表示,其表达式如下:

$$D=1-\sum_{i=1}^s(p_i)^2$$

$$H=-\sum_{i=1}^s(p_i \times \ln p_i)$$

$$E=H/\ln S$$

$$SC=2w/(a+b)$$

式中: S ——种子库物种总数; p_i ——第 i 种植物的种子数占种子库中总种子数的比例(%); w ——土壤种子库和地面植被共有的植物种数; a ——土壤种子库; b ——地面植被的植物种数。所有数据采用 Excel, PASW Statistics 18.0 和 Canoco for Windows 4.5 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 八仙山土壤种子库组成

本研究共萌发幼苗 685 株,隶属于 26 科 39 属 42 种,萌发的活性种子密度为 3.65×10^5 粒/m²。表 1 中是蓟县八仙山土壤种子库的主要物种组成,其中优势物种为酢浆草(*Oxalis corniculata*),数量为 159 株,占萌发幼苗的 23.21%;其次是中华小苦荬(*Ixeridium chinensis*),占萌发幼苗的 16.79%。从科属分布来看,菊科(*Compositae*)种子最多(占种子

总数的 30.07%),其中中华小苦荬和抱茎小苦荬(*Ixeridium sonchifolium*)贡献的比例最大。

通过对地面植被的调查发现,八仙山样地木本植物占绝大多数,乔木层极其丰富。但土壤种子库萌发

物种组成中草本植物占绝对优势,木本植物仅有 7 种,萌发的幼苗数量仅仅占幼苗总数的 4.23%。由此可见,土壤种子库虽然来源于地面植被,但不一定完全反映地面植被。

表 1 八仙山土壤种子库的主要物种组成、数量及相对密度

物种名	科名	属名	数量/粒	相对密度/%	生活型	传播类型
榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	榆科	榆属	2	0.29	落叶乔木	风媒
葎草(<i>Humulus scandens</i>)	大麻科	葎草属	19	2.77	多年生茎蔓草本植物	风媒
藜(<i>Chenopodium album</i>)	藜科	藜属	7	1.02	一年生草本植物	自体传播
皱果苋(<i>Amaranthus viridis</i>)	苋科	苋属	64	9.34	一年生中生草本	风媒
刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	豆科	刺槐属	4	0.58	落叶乔木	自体传播
酢浆草(<i>O. corniculata</i>)	酢浆草科	酢浆草属	159	23.21	多年生草本	自体传播
臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)	苦木科	臭椿属	2	0.29	落叶乔木	风媒
地锦草(<i>Euphorbia humifusa</i>)	大戟科	大戟属	2	0.29	一年生匍匐草本	自体传播
栎树(<i>Koelreuteria paniculata</i>)	无患子科	栎树属	3	0.44	落叶乔木	自体传播
苘麻(<i>Abutilon theophrasti</i>)	锦葵科	苘麻属	5	0.73	一年生中生草本	自体传播
鸡腿堇菜(<i>Viola acuminata</i>)	堇菜科	堇菜属	7	1.02	多年生旱中生草本	自体传播
细距堇菜(<i>Viola tenuicornis</i>)	堇菜科	堇菜属	2	0.29	多年生草本	自体传播
白蜡树(<i>Fraxinus chinensis</i> sub. <i>chinensis</i>)	木犀科	栲属	12	1.75	落叶乔木	风媒
牵牛(<i>Ipomoea nil</i>)	旋花科	番薯属	14	2.04	一年生缠绕草本	自体传播
田旋花(<i>Convolvulus arvensis</i>)	旋花科	旋花属	10	1.46	多年生旱生中生草本	自体传播
附地菜(<i>Trigonotis peduncularis</i>)	紫草科	附地菜属	64	9.34	一年生草本	自体传播
砂引草(<i>Tournefortia sibirica</i>)	紫草科	紫丹属	12	1.75	多年生盐生草本	自体传播
荆条(<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>)	马鞭草科	牡荆属	4	0.58	旱中生灌木	自体传播
龙葵(<i>Solanum nigrum</i>)	茄科	茄属	16	2.34	一年生草本	动物传播
茜草(<i>Rubia cordifolia</i>)	茜草科	茜草属	7	1.02	多年生攀援植物	自体传播
大丁草(<i>Leibnitzia anandria</i>)	菊科	大丁草属	15	2.19	多年生草本	风媒
鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)	菊科	鬼针草属	7	1.02	一年生草本植物	动物传播
白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)	菊科	蒿属	10	1.46	多年生旱中生草本	自体传播
黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	菊科	蒿属	6	0.88	一年生旱生中生草本	风媒
苣荬菜(<i>Sonchus wightianus</i>)	菊科	苦苣菜属	23	3.36	一年生中生草本	风媒
翅果菊(<i>Pterocypselia indica</i>)	菊科	莠苣属	6	0.88	二年生草本	风媒
抱茎小苦荬(<i>I. sonchifolium</i>)	菊科	小苦荬属	22	3.21	多年生草本	风媒
中华小苦荬(<i>I. chinensis</i>)	菊科	小苦荬属	115	16.79	多年生草本	风媒
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	禾本科	狗尾草属	38	5.55	一年生中生草本	自体传播
求米草(<i>Oplismenus hirtellus</i>)	禾本科	求米草属	13	1.90	多年生草本植物	自体传播

2.2 土壤种子库的多样性指数和相似性指数

采样地地面植被共 63 种,而土壤种子库萌发物种为 42 种,共同物种仅为 13 种,分别是矮丛薹草(*Carex callitrichos* var. *nana*)、白蜡树、白莲蒿、半夏(*Pinellia ternata*)、抱茎小苦荬、狗尾草、鬼针草、花木蓝(*Indigofera kirilowii*)、黄花蒿、藜、葎草、茜草和皱果苋,这些物种大部分为草本植物,广泛分布于地面,其产生种子数量较多,形成的短暂种子库容易萌发。经过计算,Sorenson 相似性指数仅仅为 0.248,相比于天津市其他样地,相似性指数最低。

2.3 土壤种子库与特征因子的 DCCA 分析

植物群落是植物与环境相互作用的产物^[13]。利用 DCCA 分析来分析土壤种子库和特征因子的关系,有助于更好地了解土壤种子库的特征。本研究共选取了 9 个特征因子,其中 7 个为土壤理化因子,2 个为生境因子。通过 Canoco for Windows 4.5 软件进行排序分析,结果如表 2 所示。全磷和 pH 值呈显著正相关,速效钾和海拔呈显著负相关。而其他因子之间的相关性非常小,各个因子的独立性非常强,因此分析符合因子间独立性的要求^[14]。

DCCA 排序的统计结果表明,前 4 个排序轴累积贡献率为 37.5%,只有达到 70%才能说明排序轴包含了绝大多数信息,本研究说明特征因素只能部分解释土壤种子库,其他因素对种子库仍有影响,今后的

研究中应该加以考虑^[15]。轴一和轴二的特征值分别是 0.123 和 0.065,物种与特征因子间呈显著正相关($p < 0.01$),说明环境变量能够很好地解释群落结构变化。

表 2 八仙山土壤种子库特征因子之间的相关性

因子	pH	TN	org	asp	TP	TK	AP	AK	Height
pH	1								
TN	-0.162 0	1							
org	0.185 5	-0.194 4	1						
asp	0.470 1	-0.268 8	0.766 4	1					
TP	0.668 3*	-0.426 8	0.620 0	0.581 1	1				
TK	-0.370 8	0.331 1	0.004 2	-0.021 0	-0.50 8	1			
AP	-0.072 4	0.449 8	-0.214 8	-0.228 8	-0.148 2	0.092 0	1		
AK	-0.199 7	-0.142 8	-0.528 2	-0.233 1	-0.416 9	-0.153 1	-0.507 9	1	
Height	0.240 8	-0.353 4	0.569 1	0.355 0	0.426 0	-0.008 3	-0.425 3	-0.359 7*	1

注: * 代表 $p < 0.05$; org 代表有机质; asp 代表坡向; Height 代表海拔高度; TP 代表全磷; TN 代表全氮; TK 代表全钾; AP 代表速效磷; AK 代表速效钾。

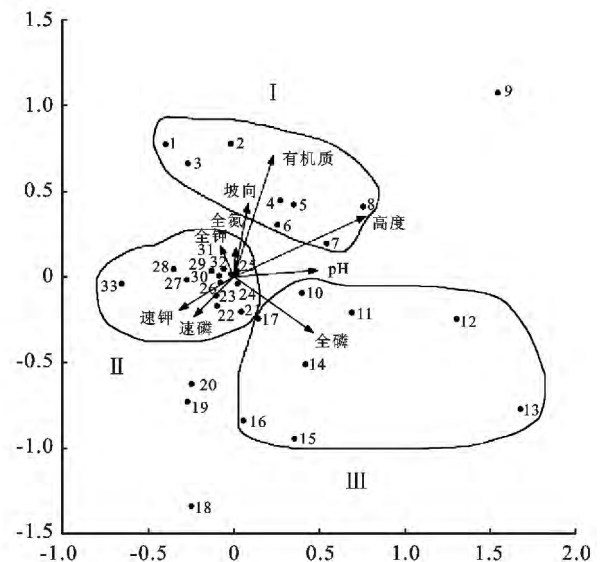
通过图 1 可以看出,物种呈现明显的 3 个聚类。聚类 I 分布在有机质含量较高的地方,聚类植物为酢浆草、臭椿、刺槐、马齿苋 (*Portulaca oleracea*)、东风菜 (*Aster scaber*)、白蜡等,这些物种都喜土壤肥沃的样地,其中东风菜对土壤肥力的要求很高。聚类 II 分布在速效磷、速效钾较高的样地,聚类植物为田旋花、附地菜、抱茎小苦菜、苜蓿菜、藜、牵牛、白莲蒿等,这些植物对土壤有机质的要求不高,因此分布在有机质含量较低的区域,但对土壤中速磷、速钾等有机元素含量要求可能较高。聚类 III 分布在全磷含量较高的区域,聚类植物为狗尾草、大丁草、荆条、细距堇菜、半夏等植物。

图 1 不仅可以反映物种对土壤因子的聚类,还以反映物种与生境因子的关系,该研究中选取了海拔高度、坡向这两个因素来进行分析。经过 DCCA 分析,海拔高度与第一轴的相关系数为 0.748 1,与第二轴的相关系数为 0.254 0,因此第一轴近似认为代表海拔梯度的变化,从左到右海拔逐渐升高。

由图 1 中可以看出,白蜡、榆树、刺槐、花木蓝、北鱼黄草 (*Merremia sibirica*)、荆条分布在海拔较高的区域,田旋花、附地菜、苜蓿菜、求米草等草本植物分布在海拔较低的样地,实际调查中也发现,这些草本植物多集中在田间、沟边等地势较为平坦的地方。

随着海拔高度的升高,植被群落类型也发生明显变化,木本植物数量明显变多。坡向与第一轴的相关系数为 0.082 8,与第二轴的相关系数为 0.429 0,因此第二轴近似反映坡向的变化,从下到上坡向逐渐向

阳。大丁草、求米草、半夏、鸡腿堇菜、细距堇菜、酢浆草、栾树等植被多分布于第二轴的下半部分。这些植物喜阴不喜阳,在实际调查中,这些植物多生长在树荫、坡底等阳光不充分的地方。



注: 图内数字代表植物,不代表样方。1. 东风菜; 2. 酢浆草; 3. 马齿苋; 4. 臭椿; 5. 刺槐; 6. 花木蓝; 7. 白蜡; 8. 榆树; 9. 鬼针草; 10. 狗尾草; 11. 独行菜; 12. 北鱼黄草; 13. 荆条; 14. 细距堇菜; 15. 中华小苦菜; 16. 半夏; 17. 栾树; 18. 矮丛藜; 19. 鸡腿堇菜; 20. 大丁草; 21. 求米草; 22. 苜蓿菜; 23. 砂引草; 24. 藜; 25. 苘麻; 26. 白莲蒿; 27. 皱果苋; 28. 附地菜; 29. 田旋花; 30. 地锦草; 31. 牵牛; 32. 葎草; 33. 抱茎小苦菜。

图 1 八仙山土壤种子库与特征因子的 DCCA 排序

图 1 中的箭头表示环境因子,箭头连线的长短表示植物群落与该环境因子相关性的 大小,箭头连线在排序轴中的斜率表示环境因子与排序轴相关性的 大小^[16]。

从图 1 可以看出,土壤理化因子中,有机质含量 是最重要的理化因子,其次是 pH、全磷。而生境因子 中海拔高度是主要的影响因子。

八仙山的土壤较贫瘠,岩石裸露,因此土壤有机 质含量较低。为了了解种子库萌发的主要物种酢浆 草和中华小苦苣与有机质的响应关系,用 GAM(gen- eralized additive models)来进行响应分析。图 2 是 分析结果,由图中可以看出酢浆草和中华小苦苣的 响应趋势完全相反,酢浆草的各个响应值随着有机 质含量升高,整体呈现下降趋势,而中华小苦苣的 响应值随着有机质含量升高,整体呈现上升趋势。 中华小苦苣的整体响应值较小的原因可能是其较耐 贫瘠,对土壤有机质的要求并不高。有关土壤种子 库的物种与环境因子的响应机制目前研究仍不是 很多,没有明确的参考依据,因此需要今后加深研 究。

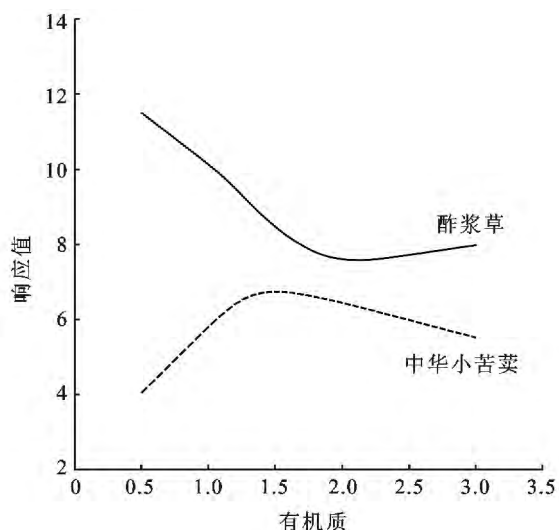


图 2 基于 GAM 模型的土壤种子库主要物种和有机质响应

3 讨论

3.1 八仙山土壤种子库组成

前期对天津市土壤种子库储量进行了全面的调 查研究,蓟县八仙山土壤种子库密度是城市绿地、城 市废弃地、自然保留地、城郊结合地等样地中密度最 低的^[17]。影响土壤种子库密度的因素有很多,例如地 面植被的种类和构成、种子传播特性、生态系统的类 型^[18]等。孙书存等^[19]对东灵山地区及张希彪等^[20] 对黄土高原子午岭的研究都发现,土壤种子库损失的

原因主要有种子腐烂和霉变、动物取食或搬运、发芽 等,其中动物搬运是种子库动态的最重要影响因子。 八仙山样地虽然地面植被种类相当丰富,但土壤种子 库密度非常低,其原因可能是:(1)样地土层较薄,岩 石裸露,动物取食的取食效应非常明显,土壤种子库 的种子损失率较大;(2)地面植被以木本植物为主, 木本植物的种子较难萌发,试验时大部分种子处于休 眠状态而并未萌发,从而大大降低了土壤种子库的 储量。

3.2 土壤种子库多样性指数和相似性指数分析

研究表明,受干扰的生境,种子库组成与地面植 被相似性较高,但随着群落的成熟、干扰的减少,两者 区别增大,越接近演替的高级阶段,相似性指数就 越低^[21]。

八仙山属于次生森林生态系统,经过数十年的保 育,植物群落已经演替到较为高级的阶段,故地面植 被和土壤种子库的相似性指数较低。用 Shannon— Wiener 多样性指数、Simpson 生态优势度指数、 Pielou 均匀度指数来表征 α 多样性指数^[22]。土壤种 子库的多样性指数是生态系统多样性最直接的反映, 可以揭示群落与环境的关系^[23]。

本研究中,酢浆草、中华小苦苣、皱果苋、附地菜 等虽然幼苗数量巨大,但幼苗数量在种间的分布均匀 度较高,Shannon—Wiener 多样性指数为 2.649; Simpson 生态优势度指数为 0.888, Pielou 均匀度指 数为 0.793。八仙山样地土壤种子库的种丰富度最 大,其他 3 项 α 多样性指数也均为天津市样地中最大 的。分析其原因,种丰富度较大成为最主要的因素, 萌发的活性种子在种间的分布较为均匀也是重要 原因。

3.3 DCCA 排序分析

通过 DCCA 分析,发现土壤种子库呈现明显的 3 类聚类。而影响土壤种子库的主要土壤理化因子为 有机质、pH 值、全磷。这是因为八仙山海拔高度较 高,土壤特征的垂直变化非常明显^[24]。海拔 800 m 以上为山地棕壤,土壤富含腐殖质,有机质含量高,约 为 12.4%,土壤中有机元素含量也较高^[25],pH 值在 5.5~6.5,略呈酸性。而 800 m 以下受到迎风坡降水 的影响,土壤水分多,土壤的盐基离子遭到淋溶,形成 淋溶褐土。因此土层较薄,含砂砾多,微碱性,土壤有 机质和 N、P 含量较山地棕壤差。因此土壤有机质、 pH 值、全磷的变化较大,成为对土壤种子库影响较大 的土壤特征因子。由于八仙山海拔高度较高,植被特 征垂直变化明显,土壤种子库的物种组成也随海拔变

化而变化较大,因此生境因子中,海拔高度是主要的影响因子。

4 结论

(1) 蓟县八仙山土壤种子库物种丰富度较高,但种子库密度非常低,岩石裸露,土层较薄,动物的取食效应明显是土壤种子库储量较低的主要原因。

(2) 蓟县八仙山土壤种子库的相似性指数较低,而 α 多样性指数非常高。这与八仙山演替阶段较高级,物种丰富度较高,种间分布较均匀有很大关系。

(3) 通过 DCCA 分析可以发现,土壤种子库呈现出明显的 3 个聚类。土壤种子库的主要土壤理化因子为有机质、pH、全磷。而生境因子中海拔高度是主要的影响因子。

(4) 排序图的第一轴近似代表了海拔高度的变化,而第二轴代表了坡向的变化。第一轴从左到右,海拔逐渐升高,群落结构明显变化,木本植物数量增多。而第二排序轴从下到上,坡向逐渐向阳,植被类型由喜阴植物逐渐变成向阳植物。

[参 考 文 献]

- [1] Terbraak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [2] 张金屯. 植被与环境关系分析(II): CCA 和 DCCA 限定排序[J]. *山西大学学报: 自然科学版*, 1992, 15(3): 292-298.
- [3] 邱扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 199-206.
- [4] 余伟莅, 郭建英, 胡小龙, 等. 浑善达克沙地东南部退化草场植物群落排序与环境解释[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(5): 760-764.
- [5] 索安宁, 王兮之, 胡玉喆, 等. DCCA 在黄土高原流域径流环境解释中的应用[J]. *地理科学*, 2006, 26(2): 205-210.
- [6] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [7] 韩英兰, 苏卫国. 天津市蓟县八仙山自然保护区木本植物区系的研究[J]. *天津农学院学报*, 1996, 3(4): 1-9.
- [8] 李洪远, 莫训强, 郝翠. 近 30 年来土壤种子库研究的回顾与展望[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 731-737.
- [9] 莫训强, 王秀明, 孟伟庆, 等. 天津地区湿地土壤种子库及其在受限空间中的植被演替研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 219-224.
- [10] 李洪远, 佐藤治雄, 森本幸裕, 等. 土壤种子库在荒废地植被恢复工程中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26(1): 140-142.
- [11] Thompson K, Bakker J P, Bekker R M, et al. The soil seed banks of North West Europe: methodology, density and longevity[M]. London: Cambridge University Press, 1997.
- [12] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 41-165.
- [13] 米湘成, 张金屯, 张峰, 等. 山西高原植被与气候的关系分析及植被数量区划的研究[J]. *植物生态学报*, 1996, 20(6): 549-560.
- [14] 杨洪晓, 卢琦, 吴波, 等. 青海共和盆地沙化土地生态修复效果的研究[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 7-12.
- [15] 翟付群, 许诺, 莫训强, 等. 天津蓟运河故道消落带土壤种子库特征与土壤理化性质分析[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(1): 97-102.
- [16] 张金屯. 排序轴分类法及其应用[J]. *生态学杂志*, 1994, 13(3): 73-751.
- [17] 莫训强. 天津滨海湿地土壤种子库特征及其与植被关系研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [18] Bossuyt B, Butaye J, Honnay O. Seed bank composition of open and overgrown calcareous grassland soils: A case study from Southern Belgium[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(4): 364-371.
- [19] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栋种子库统计[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 215-221.
- [20] 张希彪, 王瑞娟, 上官周平. 黄土高原子午岭油松林的种子雨和土壤种子库动态[J]. 2009, 29(4): 1878-1884.
- [21] Moles A T, Drake D R. Potential contributions of the seed rain and seed bank to regeneration of native forest under plantation pine in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Botany*, 1999, 37(1): 83-93.
- [22] 王永繁, 余世孝, 刘蔚秋. 物种多样性指数及其分形分析[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 391-395.
- [23] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究[J]. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [24] 王天罡. 天津八仙山自然保护区植物多样性及其保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [25] 张妍. 八仙山自然保护区森林生物量/碳储量遥感估算研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.