应用生态学报 2016年5月 第27卷 第5期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, May 2016, 27(5): 1383-1392 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201605.007

河北省塞罕坝保护区天然植物群落数量分类

秦朋遥[1] 杨会娟[2] 蒋凤玲[3] 张树彬[1] 田晓敏[1] 黄选瑞[1] 张志东[1*]
([1]河北省林木种质资源与森林保护重点实验室/河北农业大学林学院, 河北保定 071000; [2]河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定 071000; [3]河北农业大学生命科学学院, 河北保定 071000)

摘 要 运用双向指示种(TWINSPAN)和除趋势典范对应分析(DCCA)等方法定量分析了河北省塞罕坝保护区天然植物群落分布与环境因子的关系.结果表明: 塞罕坝保护区天然植物群落可划分为8种类型,即地榆+异穗苔草+金莲花群落、地榆+老芒麦+毛蕊老鹳草群落、披针叶苔草+铁丝草群落、柔毛绣线菊-铁杆蒿群落、山杏+柔毛绣线菊-铁杆蒿+披针叶苔草群落、蒙古栎+硕桦-胡枝子+柔毛绣线菊-披针叶苔草群落、白桦+山杨-毛榛+山刺玫-糙苏+披针叶苔草+唐松草群落、云杉+白桦-山刺玫+河北柳-披针叶苔草+节节草群落;DCCA分析表明,坡位和土壤养分是影响塞罕坝保护区天然植物群落空间分布的主要因子.地形、空间和土壤因子解释了物种格局变异的34.02%,其中,土壤因子占15.67%,地形因子占10.05%,空间因子占6.00%.在各类因子间的交互作用(2.30%)中,土壤和地形因子的交互作用最大(0.93%),土壤、地形和空间因子三者的交互作用最小(0.16%).65.98%未能解释的部分,可能归因于未被选取的因子如种间的协同和竞争作用或者人为干扰.

关键词 植物群落; 双向指示种法; 除趋势典范对应分析法; 环境解释

Quantitative classification of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve, Hebei Province, China.

QIN Peng-yao[1], YANG Hui-juan[2], JIANG Feng-ling[3], ZHANG Shu-bin[1], TIAN Xiao-min[1], HUANG Xuan-rui[1], ZHANG Zhi-dong[1*] ([1]*Hebei Province Key Laboratory of Forest Trees Germplasm Resources and Forest Protection/College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding* 071000, *Hebei, China*; [2]*College of Garden and Tourism, Agricultural University of Hebei, Baoding* 071000, *Hebei, China*; [3]*College of Life Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding* 071000, *Hebei, China*).

Abstract: Quantitative analysis of the relationships between the distribution of natural plant communities and environmental factors was studied using two-way indicator species analysis (TWINSPAN) and detrended canonical correspondence analysis (DCCA) methods, in the Saihanba National Nature Reserve in Hebei Province. The results showed that the natural plant communities in the Saihanba Reserve could be classified into eight types, *i.e.*, *Sanguisorba officinalis* + *Carex heterostachya* + *Trollius chinensis* community, *S. officinalis* + *Elymus sibiricus* + *Geranium platyanthum* community, *C. lanceolata* + *Ophiopogon chingii* community, *Spiraea pubescens* - *Tripolium vulgare* community, *Armeniaca sibirica* + *S. pubescens* - *T. vulgare* + *C. lanceolata* community, *Quercus mongolica* + *Betula costata* - *Lespedeza bicolor* + *S. pubescens* - *C. lanceolata* community, *Betula platyphylla* + *Populus davidiana* - *Corylus mandshurica* + *Rosa davurica* - *Phlomis umbrosa* + *C. lanceolata* + *Thalictrum aquilegifolium* community and *Picea asperata* + *B. platyphylla* - *Rosa davurica* + *Salix taishanensis* var. *hebeinica* - *C. lanceolata* + *Commelina diffusa* community. DCCA analysis indicated that slope position and soil nutrients were the main influence factors for the spatial distribution of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve. Topographic, spatial and soil factors accounted for 34.02% of the variation of species pattern. Of the variation, soil factors accounted for 15.67%, topographic factors 10.05% and spatial factors 6.00%. In the in-

本文由国家自然科学基金项目(31370636)和林业公益性行业科研专项(20150430304)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31370636) and the Special Fund for Forestry Scientific Research in the Public Interest (20150430304).
2015-10-29 Received, 2016-02-23 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhzhido@163.com

teractions among all factor combinations (2.30%), the interaction between soil and topographic factors was the largest (0.93%), and the interaction among soil, topographic and spatial factors was the least (0.16%). The unexplained portion accounted for 65.98% of spatial distribution, which might be due to anthropogenic disturbance or interspecific competition.

Key words: plant community; TWINSPAN; DCCA; environmental interpretation.

植物群落的分类和分布一直是植被生态学的研究热点[1-4],对植被进行数量分析可以准确、客观地解释植物群落特征及其与生态环境的关系,是研究植被生态学的重要手段[3-6].有研究表明,双向指示种法(TWINSPAN)、除趋势对应分析法(DCA)、除趋势典范对应分析法(DCCA)等,是目前应用最多和有效的数量分析方法[1,5,7-9].采用这些方法进行植物群落的分类和排序,对于了解研究地区的群落特征,揭示植物群落间以及它们与环境因子的生态关系,从而对保护研究地区的关键植物资源具有一定的指导作用.

植物群落的分布格局是不同空间尺度上环境(地形、土壤理化性质和气候等)、空间(群落间的相对位置)和生物因子(种间的协同和竞争、人为干扰和扩散能力等)共同作用的结果[4-6].在不同尺度下,控制植被空间分布格局的主导因子是不同的[4,10].在区域甚至全球等大尺度上,地带性气候条件是决定植被类型分布的主导因素;在景观或者群落等小尺度上,地形因子可以通过改变局部气候条件而导致植被类型的变化,进而决定植被类型的分布格局;而微生境、土壤养分等非地带性的环境因子决定最终的植被群落类型[11].除了尺度的影响,环境因子对群落分布变异的解释能力也可能因不同的植被类型、区域而异.例如,辛晓平等[12]研究发现,单独环境因子解释了松嫩平原碱化草地植物群落格局变化的40%;而王国宏等[13]发现,环境因子只解释了祁连山北坡中段森林群落格局的17.66%.

本文以河北塞罕坝地区天然植被群落为研究对象,采用TWINSPAN和DCCA等数量分类和排序方法,对植物群落的空间分布及其与环境之间的关系进行分析,为塞罕坝保护区自然植被的有效保护和退化植被的恢复重建提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

塞罕坝自然保护区位于内蒙古高原的东南缘,地处内蒙古高原与冀北山地的交接处(42°22′—42°31′ N,116°53′—117°31′ E).地貌上界于内蒙古熔岩高原和冀北山地之间,主要是高原台地.本区的地形地貌组合为高原-波状丘陵-漫滩-接坝山地[14-15].塞罕坝自然保护区属于寒温带大陆性季风气候,气候由半湿润向半干旱气候过渡,冬季长而寒冷,春秋短,夏季不明显,无霜期60 d左右,年平均气温-1.4 ℃,极端最低温度和最高温度分别为-42.8和30 ℃,≥2 ℃年积温1374 ℃,年平均降雨量450 mm,年平均蒸发量1350 mm[14].植被由森林区向草原区过渡,乔木林为天然次生林,主要物种有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和云杉(*Picea asperata*);灌木种主要有柔毛绣线菊(*Spiraea pubescens*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、山刺玫(*Rosa davurica*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、山丁子(*Malus baccata*)等;草原区物种主要有地榆(*Sanguisorba officinalis*)、金莲花(*Trollius chinensis*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、毛蕊老鹳草(*Geranium platyanthum*)、披针叶苔草(*Carex lanceolata*)和铁丝草(*Ophiopogon chingii*)等.

1.2 样方调查

调查于2014年7—9月进行.以0.5 m分辨率的航片数据和5 m分辨率的SPOT5影像数据为基础,结合已有样地和林业二类调查数据,判读出研究区的天然次生林、灌木林和草地及其他地貌类型.结合研究区不同植被类型面积比例、优势植被类型、斑块大小、形状、空间分布广布性、统计分析需求的最小样本大小等,共调查了38个典型植物群落,其中包括12个草本植被,11个灌木植被和15个天然林植被片断(图1).采取分层随机取样的方法,按斑块大小设置不同数量的调查样方数,样方间隔>50 m,共调查草本样方184个,灌木样方109个,乔木样方62个.其中,乔木样方大小为20 m×20 m,灌木为5 m×5 m,草本为1 m×1 m.在天然林斑块中,每个20 m×20 m的乔木样方中,对角线方向上设置灌木5 m×5 m和草本1 m×1 m样方各1个;在灌木林斑块中每个5 m×5 m灌木样方中设置草本1 m×1 m样方1个.记录每个样方的海拔、坡度、坡向、坐标以

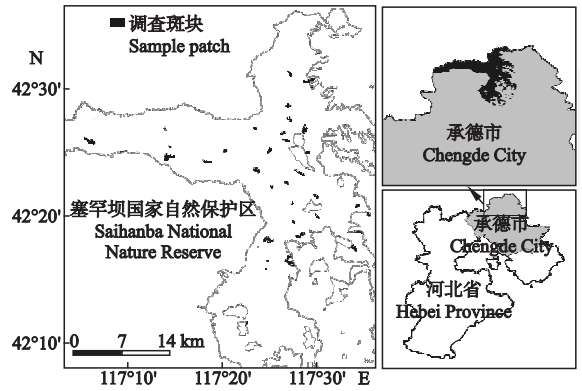


图 1　塞罕坝国家自然保护区研究区域和调查斑块分布

Fig.1　Study area and distribution of sample patches in the Saihanba National Nature Reserve.

及植被类型；乔、灌木（$DBH \geqslant 1$ cm）记录种类、高度、胸径、个体数；草本植物记录物种名、多度、平均高度和最大高度.

在每个样方的中心，采集 0～10、10～20、20～30 cm 3 层土壤样品，每个层次取一定量土样混合后放到铝盒中保存.在乔木样方中沿对角线方向取 3 个土样混合，灌木样方中取 2 个土样混合，草本样方中取 1 个土样.将取得的土样带回实验室烘干后，采用电位计法测定土壤 pH 值，重铬酸钾 pH 量法-稀释热法测定土壤有机质含量，NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定全磷含量，凯氏定氮法测定土壤全氮含量[16].

1.3　数据处理

物种重要值是表示物种在群落中优势度的一个指标，可以表示不同物种在群落中的功能地位[17].以物种重要值为基础，构造物种-斑块矩阵（360×38）.重要值计算公式为[2-3,6-7]：

木本重要值＝（相对多度＋相对频度＋相对显著度）/300

草本重要值＝（相对频度＋相对盖度＋相对高度）/300

环境数据包括 5 个土壤因子，即土壤 pH 值、土层深度、土壤有机质含量、土壤全氮和全磷含量；4 个地形因子为海拔、坡度、坡位和坡向；2 个空间因子为样方经度和纬度（表 1）.将坡位和坡向进行数字化，其余按实际观测值表示，建立环境因子-斑块矩阵（11×38）.以 10 m×10 m 分辨率的数字高程模型（DEM）数据为基础，通过地形位置指数（topographic position index，TPI）进行坡位的求算和分级：1）平地，$-0.5SD<TPI<0.5SD$，坡度＞5°；2）山谷，$TPI<-1.0SD$；3）下坡，$-1SD<TPI\leqslant-0.5SD$；4）中坡，$-0.5SD<TPI<0.5SD$，坡度≤5°；5）上坡，$0.5SD<TPI\leqslant1SD$；6）山脊，$TPI>1SD$.其中，SD 为 TPI 与邻域像元高程的标准差[18].随着数值的增加，坡位越靠近山顶.利用 TRASP（transformation of aspect）指数将样方的坡向方位角转换为 0～1[10,17,19].TRASP 指数越大，表示样方生境越干热向阳.其中：0 代表北偏东 30°；1 代表南偏西 30°.计算公式如下：

$$TRASP=\frac{1-\cos[(\pi/180)(aspect-30)]}{2}$$

式中：aspect 为样方的坡向方位角.

先对植物群落（物种-斑块矩阵）进行 TWINSPAN 分类和 DCA 排序，划分出植物群落类型，再结合环境-斑块矩阵进行 DCCA 排序，探讨群落间分布格局及其与环境因子的关系.在此基础上，根据 Bordcard 等[20]的方法，分离空间、地形和土壤 3 类环境因素对植物群落格局的影响：1）总的解释变异能力（R_t）：11 个因子全部参加分析；2）部分因子解释变异能力：单纯空间因子解释部分（R_{sp}）、单纯土壤因子解释部分（R_{so}）、单纯地形因子解释部分（R_{to}）、空间因子和土壤因子交互解释部分（R_{spso}）、空间因子和地形因子交互解释部分（R_{spto}）、土壤因子和地形因子交互解释部分（R_{soto}）、3 个因子交互解释部分（R_{spsoto}）.在各功能型矩阵中以土壤因子为解释变量，空间因子和地形因子为协变量得到 R_{so}；同样的，以空间因子为解释变量，地形因子和土壤因子为协变量得到 R_{sp}；以地形因子为解释变量，土壤因子和空间因子为协变量求得 R_{to}；根据数学方程计算得到 R_{spso}、R_{spto}、R_{soto} 和 R_{spsoto}.

地形因子中坡位的求算是利用 Land Facet Corridor Designer 工具完成，TWINSPAN 数量分类是由

表 1　环境因子的选择与识别符号

Table 1　Selection and identification marks of environmental factors

环境因子 Environmental factor		代码 Code
土壤因子	土壤 pH Soil pH	S-pH
Soil factor	土壤有机质 Soil organic matter（$g \cdot kg^{-1}$）	S-OM
	全磷含量 Total phosphorus content（$g \cdot kg^{-1}$）	S-TP
	全氮含量 Total nitrogen content（$g \cdot kg^{-1}$）	S-TN
	土层深度 Soil depth（cm）	S-Dp
地形因子	海拔 Altitude（m）	T-Alt
Topography	坡度 Slope（°）	T-Slo
factor	坡向 Aspect	T-Asp
	坡位 Soil position	T-SP
空间因子	经度 Longitude	Lon
Spatial factor	纬度 Latitude	Lat

WinTWINS 2.3 完成,DCA 和 DCCA 排序通过 Canoco 5.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 天然植物群落物种组成

在调查的 38 个斑块中,共记录 360 个物种,分属 54 科、196 属.其中,乔木 16 种,灌木 45 种,草本 299 种.菊科物种占 16.4%,禾本科占 9.7%,蔷薇科占 8.6%,豆科占 6.1%.相对于科的分布,属的分布相对分散,主要属有蒿属(13 种),委陵菜属(11 种),苔草属(10 种)等(表 2).其中,在全部样方中累积重要值较大的植物种有白桦、蒙古栎、山杨、柔毛绣线菊、山杏、山刺玫、披针叶苔草、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、地榆、歪头菜(*Vicia unijuga*)和铁丝草等.

2.2 植物群落类型划分

TWINSPAN 是运用二歧式(正负指示种)的分类方法来划分群落类型,程序运行时以物种-斑块的重要值矩阵(360×38)为基础,将物种重要值分为 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、>0.6,共 5 级,最后列表的最大物种数为 100,最大分级水平为 6,分类的每个组中斑块个数最小值为 5(<5 则不再进行下一级划分),每次分类的最大指示种数为 7.最终,通过 TWINSPAN 表得到第 4 级分类水平下的聚类分析图,将 38 个斑块分成了 11 类(图 2).

DCA 排序轴能够很好地反映一定的生态梯度.

表 2 塞罕坝自然保护区主要植物统计

Table 2 Statistics of main plants in the Saihanba National Nature Reserve

科 Family	属 Genus	种 Species	比例 Percentage	属 Genus	种 Species	比例 Percentage
菊科 Asteraceae	29	59	16.4	蒿属 *Artemisia*	13	3.6
禾本科 Gramineae	19	35	9.7	委陵菜属 *Potentilla*	11	3.1
蔷薇科 Rosaceae	15	31	8.6	苔草属 *Carex*	10	2.8
豆科 Leguminosae	7	22	6.1	野豌豆属 *Vicia*	7	1.9
唇形科 Lamiaceae	14	19	5.3	忍冬属 *Lonicera*	6	1.7
毛茛科 Ranunculaceae	9	17	4.7	胡枝子属 *Lespedeza*	5	1.4
伞形科 Umbelliferae	13	15	4.2	早熟禾属 *Poa*	5	1.4
莎草科 Cyperaceae	4	14	3.9	桦木属 *Betula*	5	1.4
百合科 Liliaceae	8	12	3.3	蓼属 *Polygonum*	5	1.4
玄参科 Scrophulariaceae	5	12	3.3	乌头属 *Aconitum*	5	1.4
蓼科 Polygonaceae	5	10	2.8	婆婆纳属 *Veronica*	5	1.4
桦木科 Betulaceae	3	8	2.2	鹅观草属 *Roegneria*	4	1.1
忍冬科 Caprifoliaceae	3	8	2.2	橐吾属 *Ligularia*	4	1.1
十字花科 Brassicaceae	6	7	1.9	栒子属 *Cotoneaster*	4	1.1
石竹科 Caryophyllaceae	5	7	1.9	马先蒿属 *Pedicularis*	4	1.1
总计 Total	145	276	76.7	总计 Total	93	25.8

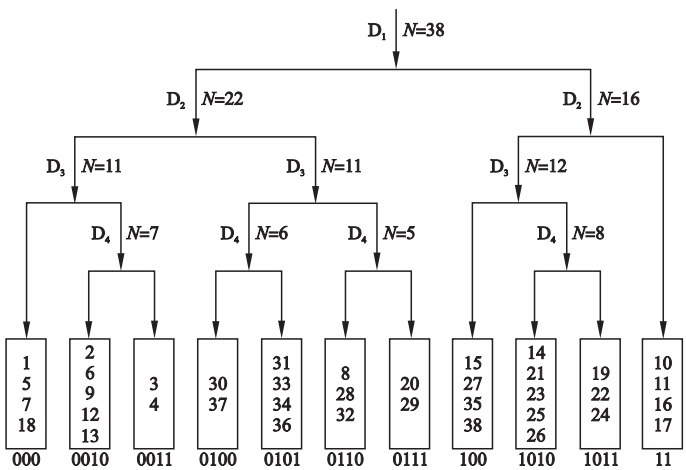


图 2 天然植物群落 38 个斑块的 TWINSPAN 分类树状图

Fig.2 Dendrogram of TWINSPAN classification of 38 sample patches in the natural plant community.

1~38 分别代表 38 个调查斑块 1-38 represented the 38 sample patches, respectively. 下同 The same below.

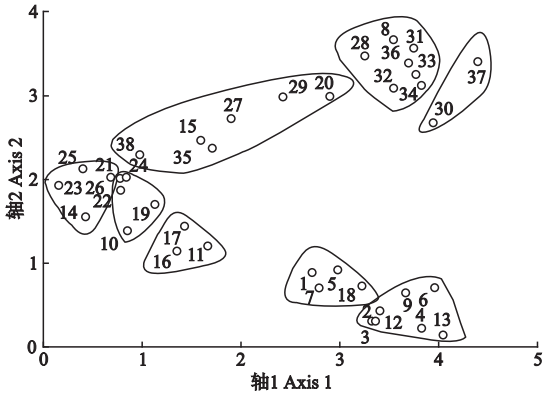


图 3　塞罕坝国家自然保护区 38 个天然植物群落斑块的 DCA 二维排序图

Fig.3　Two-dimensional DCA ordination diagram of 38 sample patches of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve.

DCA 排序图前 2 轴的累积解释能力为 13.75%，由图 3 可以看出，聚类结果基本与 TWINSPAN 的第 3 级分类结果一致（图 3）.但考虑到空间的连续性和实际的生态学意义，依据中国植被的分类原则和系统，并结合实地调查结果，将 38 个斑块分为 8 个群落，分别是：

1）地榆+异穗苔草（*Carex heterostachya*）+金莲花群落（C_1）：草本植物群落，包括斑块 2、3、4、6、9、12 和 13.优势种为地榆、异穗苔草和金莲花，主要伴生种为蓬子菜（*Galium verum*）、拳蓼（*Polygonum bistorta*）、马先蒿（*Pedicularis tatarinowii*）、巨序剪股颖（*Agrostis gigantea*）、大穗苔草（*Carex rhynchophysa*）等.

2）地榆+老芒麦+毛蕊老鹳草群落（C_2）：偶见灌木种的草本植物群落，包括斑块 1、5、7 和 18.主要灌木种为三蕊柳（*Salix nipponica*）、黑果栒子（*Cotoneaster melanocarpus*）和金露梅（*Potentilla fruticosa*），其中，三蕊柳出现在斑块 1 和 18 中，重要值较高，可能对草本植物群落结构有所影响.草本层主要物种为地榆、老麦芒和毛蕊老鹳草，伴生种有野火球（*Trifolium lupinaster*）、拳蓼、野艾蒿（*Artemisia lavandulifolia*）、大叶章（*Deyeuxia purpurea*）、毛茛（*Ranunculus japonicus*）、水杨梅（*Adina pilulifera*）等.

3）披针叶苔草+铁丝草群落（C_3）：偶见灌木种的草本植物群落，包括斑块 11、16 和 17.偶见灌木种有柔毛绣线菊、金露梅、山丁子和阴山胡枝子（*Lespedeza inschanica*）.草本层主要物种为地榆、唐松草、披针叶苔草、铁丝草、歪头菜、石竹（*Dianthus chinensis*）和阿尔泰针茅（*Stipa krylovii*），其中，披针叶苔草和铁丝草最具优势地位.伴生种很多，主要有冰草（*Agropyron cristatum*）、祁州漏芦（*Stemmacantha uniflora*）、狼毒（*Euphorbia fischeriana*）、斑叶堇菜（*Viola variegata*）、北柴胡（*Bupleurum chinense*）等.

4）柔毛绣线菊-铁杆蒿（*Tripolium vulgare*）群落（C_4）：具有灌草双层结构，包括斑块 10、19、22 和 24.灌木层主要优势种为柔毛绣线菊，主要伴生种为胡枝子和山丁子.草本层优势种为铁杆蒿，主要伴生种有广布野豌豆（*Vicia cracca*）、披针叶苔草、铁丝草、斑叶堇菜、祁州漏芦和小白蒿（*Artemisia frigida*）.

5）山杏+柔毛绣线菊-铁杆蒿+披针叶苔草群落（C_5）：具有灌草双层结构，包括斑块 14、21、23、25 和 26.灌木层主要优势种为山杏和柔毛绣线菊，其中山杏处于最优地位，主要伴生种为大果榆（*Ulmus macrocarpa*）.草本层主要优势种为铁杆蒿和披针叶苔草，主要伴生种为唐松草、委陵菜（*Potentilla chinensis*）、山丹（*Lilium pumilum*）.

6）蒙古栎+硕桦（*Betula costata*）-胡枝子+柔毛绣线菊-披针叶苔草群落（C_6）：具有乔灌草复合结构，包括斑块 15、20、27、29、35 和 38.乔木层主要优势种为蒙古栎和硕桦，其中蒙古栎占大部分，主要伴生种有白桦和山杨.灌木层优势种为胡枝子和柔毛绣线菊，主要伴生种为山刺玫和山丁子.草本层优势种为披针叶苔草，主要伴生种为并头黄芩（*Scutellaria scordifolia*）、麻根苔草（*Carex arnellii*）、唐松草和轮叶沙参（*Adenophora tetraphylla*）.

7）白桦+山杨-毛榛+山刺玫-糙苏（*Phlomis umbrosa*）+披针叶苔草+唐松草群落（C_7）：具有乔灌草复合结构，包括斑块 8、28、31、32、33、34 和 36.乔木层主要优势种为白桦和山杨，主要伴生种有华北落叶松和花楸（*Sorbus pohuashanensis*）.灌木层优势种为毛榛和山刺玫，其中毛榛占大多数，伴生种为黑果栒子和河北柳.草本层优势种为糙苏、披针叶苔草和唐松草，主要伴生种有蚊子草（*Filipendula palmate*）、砧草（*Galium boreale*）和林地早熟禾（*Poa nemoralis*）.

8）云杉+白桦-山刺玫+河北柳（*Salix taishanensis* var. *hebeinica*）-披针叶苔草+节节草（*Commelina diffusa*）群落（C_8）：具有乔灌草复合结构，包括调查斑块 30 和 37.乔木层优势种为云杉和白桦，其中云杉重要值较大，伴生种为华北落叶松和花楸.灌木层由河北柳和山刺玫组成.草本层优势种为披针叶苔草和节节草，主要伴生种为蚊子草、砧草、小花风毛菊（*Saussurea parviflora*）和毛蕊老鹳草.

表 3 塞罕坝国家自然保护区 8 个植物群落主要特征

Table 3 Main characteristics of eight plant communities in the Saihanba National Nature Reserve

群落类型 Community type	T-Alt (m)	T-Slo (°)	T-Asp	S-pH	S-OM (g·kg^{-1})	S-TP (g·kg^{-1})	S-TN (g·kg^{-1})
C_1	1474.69~1844.15	0.85~13.58	0.40~0.98	5.57~6.40	28.63~138.94	0.98~3.20	0.98~9.89
C_2	1478.08~1817.29	4.48~11.60	0.44~0.95	6.30~6.45	103.13~166.43	0.21~2.04	1.17~3.62
C_3	1516.47~1836.28	1.66~11.28	0.05~0.91	6.03~6.44	84.05~197.02	0.26~1.70	0.39~3.69
C_4	1710.25~1869.23	2.18~10.58	0.20~0.89	6.23~6.37	98.35~114.30	0.71~1.04	1.58~2.14
C_5	1515.21~1677.05	4.62~17.68	0.10~0.79	5.46~6.35	114.41~161.51	0.63~1.66	1.55~4.54
C_6	1447.41~1668.38	5.47~11.10	0.00~0.95	5.71~6.40	99.21~136.40	0.57~1.36	0.55~1.89
C_7	1464.53~1853.60	3.70~14.84	0.18~0.80	5.61~6.41	71.64~146.18	0.83~1.67	1.30~2.94
C_8	1580.49~1856.88	3.38~11.89	0.02~0.17	6.26	34.96~48.89	1.24~1.47	2.65~3.33

C_1: 地榆+异穗苔草+金莲花群落 *Sanguisorba officinalis* + *Carex heterostachya* + *Trollius chinensis* community; C_2: 地榆+老芒麦+毛蕊老鹳草群落 *S. officinalis* + *Elymus sibiricus* + *Geranium platyanthum* community; C_3: 披针叶苔草+铁丝草群落 *Carex lanceolata* + *Ophiopogon chingii* community; C_4: 柔毛绣线菊-铁杆蒿群落 *Spiraea pubescens* - *Tripolium vulgare* community; C_5: 山杏+柔毛绣线菊-铁杆蒿+披针叶苔草群落 *Armeniaca sibirica* + *S. pubescens* - *T. vulgare* + *C. lanceolata* community; C_6: 蒙古栎+硕桦-胡枝子+柔毛绣线菊-披针叶苔草群落 *Quercus mongolica* + *Betula costata* - *Lespedeza bicolor* + *S. pubescens* - *C. lanceolata* community; C_7: 白桦+山杨-毛榛+山刺玫-糙苏+披针叶苔草+唐松草群落 *Betula platyphylla* + *Populus davidiana* - *Corylus mandshurica* + *Rosa davurica* - *Phlomis umbrosa* + *C. lanceolata* + *Thalictrum aquilegifolium* community; C_8: 云杉+白桦-山刺玫+河北柳-披针叶苔草+节节草群落 *Picea asperata* + *B. platyphylla* - *R. davurica* + *Salix taishanensis* var. *hebeinica* - *C. lanceolata* + *Commelina diffusa* community.

各植物群落的地形、土壤条件存在一定的差异，具体情况见表 3.

2.3 DCCA 排序分析

以物种-斑块矩阵(360×38)和环境-斑块矩阵(11×38)为基础，进行 DCCA 排序，得出塞罕坝自然保护区内天然植物群落与环境因子(包括 5 个土壤因子、4 个地形因子和 2 个空间因子)的 DCCA 排序结果.由表 4 可以看出，前 4 个排序轴的特征值之和可以揭示 19.1%的群落和物种分布变化规律以及 39.1%的物种与环境的关系.蒙特卡洛检验(Monte Carlo test，循环次数 $n=499$)显示，群落及环境在第 1 排序轴($F=1.6$，$P=0.008$)和所有排序轴($F=1.2$，$P=0.002$)均存在显著相关性，表明 DCCA 排序结果是可信的，可以较好地解释群落分布与环境因子间的关系.

根据 11 个环境变量与 DCCA 排序轴的相关性分析可知(表 5)，经度、有机质含量、全磷含量、全氮含量和坡位与 DCCA 第 1 轴显著相关，从相关系数来看，土壤养分和空间位置是决定塞罕坝自然保护区内天然植物群落空间分布的主导因子，地形因子也起到一定作用.有机质含量、土层深度和坡向与 DCCA 第 2 轴显著相关，表明土壤因子起主导作用.

由 DCCA 斑块排序图可知(图 4)，第 1 轴主要反映了土壤全磷含量、全氮含量、坡位、坡度和经度等为主导的综合因子的影响，第 2 轴主要反映了土层深度、坡向和土壤有机质含量等为主导的综合因子的影响.

沿着第 1 轴从左到右，随着经度减小、坡位降低、土壤全磷和全氮含量升高，植物群落类型由灌木群落、乔木群落过渡到草本植物群落.沿着第2轴自

表 4 塞罕坝保护区天然植物群落的 DCCA 排序

Table 4 DCCA ordination of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve

项目 Item	第 1 轴 Axis 1	第 2 轴 Axis 2	第 3 轴 Axis 3	第 4 轴 Axis 4
特征值 Eigenvalue	0.491	0.385	0.274	0.502
物种-环境相关性 Species-environment correlation	0.943	0.888	0.930	0.000
物种数据的方差累计百分比 Cumulative percentage variance of species data	5.7	10.1	13.3	19.1
物种-环境关系的方差累计百分比 Cumulative percentage variance of species-environmental relation	16.7	29.8	39.1	0.0

表 5 11 个环境变量与 DCCA 排序轴的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between 11 environmental variables and DCCA ordination axes

	Lon	Lat	S-pH	S-OM	S-TP	S-TN	S-Dp	T-Alt	T-Slo	T-Asp	T-SP
第 1 轴 Axis 1	−0.500**	0.389**	−0.136	−0.471**	0.719**	0.653**	0.338**	0.114	−0.370**	0.270*	−0.467**
第 2 轴 Axis 2	−0.055	−0.236	−0.076	−0.388**	0.036	−0.062	0.495**	−0.078	0.080	−0.340**	0.167
第 3 轴 Axis 3	0.144	−0.304*	0.034	0.249	0.399**	−0.124	0.336**	0.079	−0.060	0.155	0.111

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

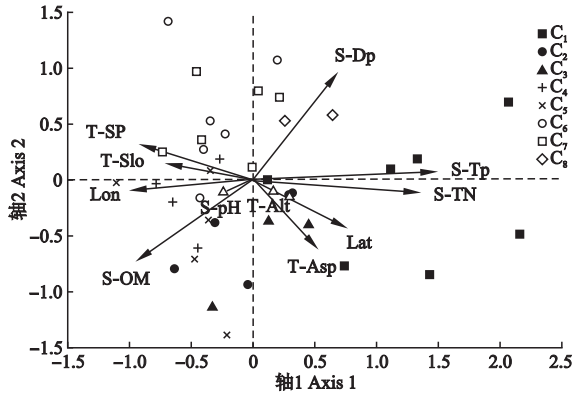


图 4　塞罕坝保护区 38 个天然植物群落的 DCCA 排序图

Fig.4　DCCA ordination diagram of 38 natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve.

C_1～C_8为群落类型，见表 3 Community type of C_1 to C_8 saw Table 3.

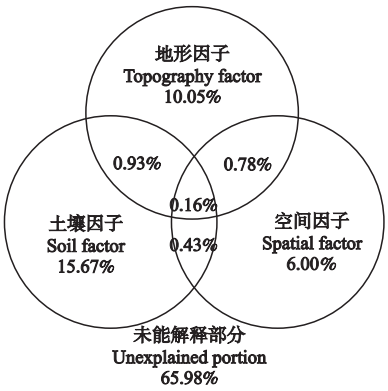


图 5　影响群落分布的地形、土壤和空间因子的变异分离

Fig.5　Variance partitioning of topography, soil and spatial factors for explaining community distribution.

下到上，坡向由阳坡转为阴坡，热量降低，土壤有机质减少，土层深度变厚，植物群落类型由草本植物群落、灌木群落过渡到乔木群落.草本植物群落都生长在阳光充足的阳坡或半阳坡，随着土壤有机质含量减少，全磷、全氮含量升高，土层深度增加，坡位降低，坡度减小，依次分布群落 C_2、C_3、C_1，各类型之间生境条件也有少量的重叠.群落 C_5在排序图最下方和最左边均有分布，表明该群落主要分布在土壤全磷和全氮贫瘠、有机质丰富、阳光充足的阳坡和半阳坡，位于山体的中坡和上坡位.群落 C_4与 C_5的生长环境相似，但群落 C_4对土壤养分的要求适中.群落 C_6和 C_7的生长环境相似，对土壤有机质、全磷和全氮含量的要求适中，坡位靠上，土层深度较大，坡向比灌木、草本植物群落都小.群落 C_8比其他乔木群落的土壤全磷和全氮含量均高，坡度小，坡位低.

2.4　植物群落空间分布的环境因素分解

将环境因子对塞罕坝地区天然植物群落空间分布的解释能力进行定量分解可知，3 类环境因子共解释塞罕坝地区天然植物群落的 34.02%，未能解释的部分占 65.98%.地形因子的解释能力为 11.92%，其中 10.05%为纯地形因子所引起的变化；土壤因子的解释能力为 17.19%，其中纯土壤因子所引起的变化占 15.67%；空间因子的解释能力为 7.37%，其中 6.00%为纯空间因子引起的变化.塞罕坝地区环境因素对天然植物群落分布格局的影响，既有各类因子的单独作用，也有相互之间的耦合作用.地形和土壤因子的耦合作用为 0.93%，地形和空间因子的耦合作用为 0.78%，空间和土壤因子的耦合作用为 0.43%，3 类环境因子的共同作用为 0.16%.结果表明，土壤因子和环境因子是影响塞罕坝地区天然植物群落分布的主导因子，而 3 类环境因子两两的耦合作用以及三者的共同作用对群落格局几乎没有影响(图 5).

3　讨　　论

3.1　植物群落类型的划分和环境解释

本研究采用 TWINSPAN 分类与 DCA 排序相结合的方法，将塞罕坝地区天然植被群落分成了 8 类.塞罕坝地区植物群落的分布格局是土壤、地形等各种因子综合作用的结果.DCCA 排序可以较好地揭示群落类型分布与环境之间的关系，但是 DCCA 排序图中斑块分布比较集中，群落间的界限没有 DCA 斑块排序图效果明显[8-9,12,21-22].坡度、坡位、坡向与土壤全氮、全磷、有机质等土壤因子是影响塞罕坝地区植被分布的最主要环境因子.许多研究表明，在地形因子中，海拔为山区植物群落分布的主导因子[1,4,17,22-24].但本研究区的海拔梯度较小，海拔对群落格局作用不明显，而坡位和坡度的作用比较显著，这与各植物群落类型优势种生长特性有关.如草本植物群落主要分布在平地坡度较缓的地区，这些地方河流、湖泊众多，特殊的生境只适合耐水淹、喜湿的草本植物生长，如地榆、披针叶苔草、异穗苔草、老芒麦等.而乔木和灌木群落主要分布在山体的中上坡位坡度较陡的地区，这与喜阳、耐瘠薄的乔木和灌木广布种山杨、白桦、蒙古栎、柔毛绣线菊和山杏等特性有关.刘瑞雪等[1]研究发现，水淹影响水滨带植物群落空间分布.余敏等[2]和宋同清等[6]也发现，在海拔梯度较小的范围内，坡位、坡度等地形因子对群落分布的影响更显著.土壤养分是影响群落分布的另一主要因素.本研究发现，土壤养分含量较多的区域主要分布草本植物群落，土壤养分含量适中的

区域主要分布乔木群落,土壤养分含量较少的区域主要分布灌木群落.土壤养分对于植被生长起着极其重要的作用,是最终决定群落类型分布的环境因子[11].余敏等[2]、臧润国等[25]和刘秋锋等[17]均通过研究验证了土壤养分对群落分布格局的重要性.

本研究发现了一个尺度下控制群落空间分布格局的主导因子,有待结合地理信息系统从不同尺度研究影响植物群落空间分布的主导因子.DCCA 排序虽然能够综合利用复杂的植物群落、地形、土壤、空间等信息进行植被与环境关系间的定量分析解释,但它是基于静态的植被-环境数据来分析的,对于干扰-格局动态方面无法解释,在景观尺度上,植被-环境关系的解释还有待从过程-格局动态方面进行深入研究.

3.2 因子分解

从本研究可知,土壤、地形和空间因子对植物群落分布格局的独立解释能力远高于交互解释能力.无论是独立解释能力还是交互解释能力,土壤因子的解释能力总是最强,地形因子次之,空间因子最低.地形和土壤因子共解释塞罕坝地区天然植被群落分布格局的 28.02%,空间因子解释了 6.00%,未解释部分占 65.98%.沈泽昊等[23]认为,环境因素对植被群落分布的可解释程度主要由植被本身的复杂性决定,植被越复杂,环境的可解释程度越低.有很多研究通过比较得出的结果证明了这一点[1,5].综合近几年使用约束性排序分离环境因子对群落分布格局影响的研究(表 6)可以看出,随着植被类型复杂性的增加(由温带荒漠草原到亚热带常绿阔叶林),环境因子的可解释程度逐渐减弱,由 70.7%降低到 9.5%,其中草原区的环境解释能力明显比森林灌丛区高.塞罕坝地区的天然植物群落 DCCA 排序存在 65.98%未能被解释的部分,这表明该地区存在其他因素的影响,如塞罕坝自然保护区原是以木材生产为主要目的的河北省塞罕坝机械林场的一部分,目前保护区内仍有相当比例的华北落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等人工林分布.这些人工林隔断了原本连片分布的天然植物群落,对天然植物的种子扩散、天然更新产生了一定程度的影响.另一方面,保护区建立前,长期大面积造林造成天然植物群落分布主要局限于人工林采伐迹地及土壤贫瘠等不适于人工造林的地方,人为改变了天然植物群落的自然分布规律[26].此外,保护区内由于监管不到位,放牧、盗采药用植物等现象时有发生.这些人类干扰和土地利用方式的改变对天然植被群落生态系统的影响是深远的,甚至是无法逆转的[27].另外,如小气候差异、物种间竞争、林分结构等都有可能影响天然植物群落分布格局.如果想恢复和重建原有物种区系及丰富度,增强群落稳定性,促进群落生态系统服务功能的发挥,需要进一步地研究天然植物群落的分布格局及其影响因子.

表 6 植被类型与变异解释率

Table 6 Vegetation types and explained variation

区域 Zone	植被类型 Vegetation type	变异解释率 Explained variation (%)	文献 Reference
内蒙古中西部 Middle and west of inner Mongolia	温带荒漠草原 Temperate desert steppe	70.70	[5]
松嫩平原 Songnen plain	温带典型草原 Temperate typical steppe	69.10	[12]
木论喀斯特峰丛洼地 Karst cluster-peak depression region, Mulun	亚热带常绿落叶阔叶混交林 Subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest	39.16	[6]
中条山混沟地区 Hungou zone, Zhongtiao Mountains	暖温带落叶阔叶林 Warm-temperate deciduous broad-leaved forest	37.66	[17]
山西灵空山 Lingkong Mountain, Shanxi	暖温带典型森林 Warm-temperate typical forest	35.00	[2]
塞罕坝自然保护区 Saihanba National Nature Reserve, Hebei	寒温带混交林和灌丛 Cool mixed forest and shrub	28.02	本研究 This paper
祁连山北坡中段 The northern slopes of Qilian Mountain	寒温带针叶纯林和高山灌丛 Cool coniferous pure forest and alpine shrubs	22.58	[13]
丹江口水库水滨带 The riparian zone of Danjiangkou reservoir	亚热带水滨带典型森林和灌丛 Subtropical edgewater typical forest and shrubs	21.99	[1]
岷江上游 The upper of Minjiang River	温带干旱灌丛 Warm temperate shrub forest	21.47	[28]
三峡大老岭地区 Dalaoling region, Three gorges	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaved forest	9.50	[23]

参考文献

[1] Liu R-X（刘瑞雪），Chen L-Q（陈龙清），Shi Z-H（史志华）. Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in the riparian zone of Danjiangkou Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），2015，**35**(4)：1208-1216（in Chinese）

[2] Yu M（余　敏），Zhou Z-Y（周志勇），Kang F-F（康峰峰），*et al*. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshegou of Lingkong Mountain，Shanxi，China. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2013，**37**(5)：373-383（in Chinese）

[3] Zhu Y-P（朱彦鹏），Liang J（梁　军），Sun Z-Q（孙志强），*et al*. Numerical classification，ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Kunyu Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*（林业科学），2013，**49**(4)：54-61（in Chinese）

[4] Bai Y-H（白玉宏），Zhang Q-D（张钦弟），Bi R-C（毕润成）. Relationship between *Sambucus williamsii* community distribution and the environmental factors in Shanxi. *Scientia Silvae Sinicae*（林业科学），2013，**49**(12)：18-24（in Chinese）

[5] Zhang Q（张　庆），Niu J-M（牛建明），Buyantuyev A，*et al*. Ecological analysis and classification of *Stipa breviflora* communities in the Inner Mongolia region：The role of environmental factors. *Acta Prataculturae Sinica*（草业学报），2012，**21**(1)：83-92（in Chinese）

[6] Song T-Q（宋同清），Peng W-X（彭晚霞），Zeng F-P（曾馥平），*et al*. Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve，karst cluster-peak depression region. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2010，**34**(3)：298-308（in Chinese）

[7] Ju T-Z（巨天珍），Wang Y（王　彦），Ren H-F（任海峰），*et al*. Classification，ordination，and succession of secondary forests in Xiaolongshan National Nature Reserve in west Qinling. *Chinese Journal of Ecology*（生态学杂志），2012，**31**(1)：23-29（in Chinese）

[8] Zhang X-P（张先平），Wang M-B（王孟本），She B（佘　波），*et al*. Numerical classification and ordination of forest communities in Pangquangou National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），2006，**26**(3)：754-761（in Chinese）

[9] Zhang F（张　峰），Zhang J-T（张金屯），Zhang F（张　峰）. Pattern of forest vegetation and its environmental interpretation in Zhuweigou，Lishan Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），2003，**23**(3)：421-427（in Chinese）

[10] Xu Y-J（徐远杰），Chen Y-N（陈亚宁），Li W-H（李卫红），*et al*. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley，Xinjiang，China. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2010，**34**(10)：1142-1154（in Chinese）

[11] Siefert A，Ravenscroft C，Althoff D，*et al*. Scale dependence of vegetation-environment relationships：A meta-analysis of multivariate data. *Journal of Vegetation Science*，2012，**23**：942-951

[12] Xin X-P（辛晓平），Gao Q（高　琼），Li Z-Q（李镇清），*et al*. Partitioning the spatial and environmental variations of plant community structure of Alkaline Grassland on Songnen Plain. *Acta Botanica Sinica*（植物学报），1999，**41**(7)：102-108（in Chinese）

[13] Wang G-H（王国宏），Yang L-M（杨利民）. Gradient analysis and environmental interpretation of woody plant communities in the middle section of the northern slopes of Qilian Mountain，Gansu，China. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2001，**25**(6)：733-740（in Chinese）

[14] Zhang S-Z（张树梓），Li M（李　梅），Zhang S-B（张树彬），*et al*. Factors affecting natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei，China. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），2015，**35**(16)：5403-5411（in Chinese）

[15] Wang Q-S（王庆锁），Li Y-Z（李玉中），Lu D-Z（路端正），*et al*. Analysis on transitional feature of Saihanba spermatophyte flora in Hebei Province. *Chinese Journal of Ecology*（生态学杂志），2005，**24**(5)：473-477（in Chinese）

[16] Lu R-K（鲁如坤）. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing：China Agricultural Science and Technology Press，2000（in Chinese）

[17] Liu Q-F（刘秋锋），Kang M-Y（康慕谊），Liu Q-R（刘全儒）. Quantitative classification and environmental interpretation of forest tree species in Hungou，Zhongtiao Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2006，**30**(3)：383-391（in Chinese）

[18] Wei J-L（韦金丽），Wang G-B（王国波），Ling Z-Y（凌子燕）. The extraction and analysis of landform characters based on high-resolution DEM. *Geomatics & Spatial Information Technology*（测绘与空间地理信息），2012，**35**(1)：33-36（in Chinese）

[19] Xu G-C（徐广才），Kang M-Y（康慕谊），Ma M（马敏），*et al*. The relationship between herbaceous vegetation and environment in middle reach of Halaqingou Stream Valley，Mt. Daqingshan，Inner Mongolia. *Journal of Mountain Science*（山地学报），2007，**25**(4)：393-399（in Chinese）

[20] Borcard D，Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*，1992，**73**：1045-1055

[21] Zhu J-T（朱军涛），Yu J-J（于静洁），Wang P（王平），*et al*. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejin Desert Oasis of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），2011，**35**(5)：480-489（in Chinese）

[22] Sunri G-G（苏日古嘎），Zhang J-T（张金屯），Zhang B（张　斌），*et al*. Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），2010，**30**(10)：2621-2629（in Chinese）

[23] Shen Z-H (沈泽昊), Zhang X-S (张新时). The spatial pattern and topographic interpretation of the forest vegetation at Dalaoling Region in the Three Gorges. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2000, **42**(10): 1089-1095 (in Chinese)

[24] Song A-Y (宋爱云), Liu S-R (刘世荣), Shi Z-M (史作民), *et al*. Quantitative classification and ordination of subalpine meadow in Wolong Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(7): 1174-1178 (in Chinese)

[25] Zang R-G (臧润国), Jing X-H (井学辉), Ding Y (丁 易), *et al*. Quantitative classification, ordination and environmental analysis of woody plant communities in Xiaodonggou Forest Area of the Altai Mountain, Xinjiang. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(2): 24-31 (in Chinese)

[26] Zhu Y (朱 源), Qiu Y (邱 扬), Fu B-J (傅伯杰), *et al*. Numerical analysis on ecological gradient of plant communities in Donggou catchment, Hebei Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(5): 799-802 (in Chinese)

[27] Svenning JC, Baktoft KH, Balslev H. Land-use history affects understorey plant species distributions in a large temperate-forest complex, Denmark. *Plant Ecology*, 2009, **201**: 221-234

[28] Zhang W-H (张文辉), Lu T (卢 涛), Ma K-M (马克明), *et al*. Analysis on the environmental and spatial factors for plant community distribution in the arid valley in the upper reach of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(3): 552-559 (in Chinese)

作者简介 秦朋遥,男,1989 年生,硕士研究生. 主要从事景观格局动态研究. E-mail: qpyhebei@126.com

责任编辑 孙 菊

秦朋遥, 杨会娟, 蒋凤玲, 等. 河北省塞罕坝保护区天然植物群落数量分类. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1383-1392
Qin P-Y, Yang H-J, Jiang F-L, *et al*. Quantitative classification of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve, Hebei Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1383-1392 (in Chinese)