华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律

唐丽丽¹ 杨 彤¹ 刘鸿雁² 康慕谊^{3,4} 王仁卿⁵ 张 峰⁶ 高贤明⁷ 岳 明⁸
张 梅¹ 郑璞帆¹ 石福臣^{1*}

¹南开大学生命科学学院, 天津 300071; ²北京大学城市与环境学院, 北京大学生态研究中心, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; ³北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; ⁴北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875; ⁵山东大学生命科学院, 济南 250100; ⁶山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; ⁷中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点试验室, 北京 100093; ⁸西北大学西部资源生物与现代生物技术教育部重点实验室, 西安 710069

摘 要 生境差异是影响植物群落及其物种多样性分布格局的重要因素。该研究基于370个荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)灌丛的野外调查样方, 结合多元回归树(MRT)、显著性分析、Pearson相关分析等技术手段, 分析了华北地区荆条灌丛及其物种多样性的空间分布格局。结果表明: 荆条灌丛的经纬度均跨越10°以上, 可分为高、中、低纬度分布区; 分布海拔则从117 m至1 248 m跨越了1 000 m以上, 也可分为高、中、低海拔分布区。所有分布区中荆条灌丛草本层的Shannon-Wiener指数、Simpson指数和均匀度指数均高于灌木层。灌木层物种多样性随着纬度的降低而降低, 随着海拔的升高而降低; 草本层相反, 物种多样性随着纬度降低而升高, 随着海拔升高而升高。灌木层和草本层的物种丰富度(Shannon-Wiener指数)与水、热、地形等环境因子显著相关, 其中灌木层物种多样性随着气温、坡位升高而显著减少, 随着降水的增加而显著增加; 草本层则相反。

关键词 荆条灌丛; 物种多样性指数; 分布格局; 植物群落

唐丽丽, 杨彤, 刘鸿雁, 康慕谊, 王仁卿, 张峰, 高贤明, 岳明, 张梅, 郑璞帆, 石福臣 (2019). 华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律. 植物生态学报, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

Distribution and species diversity patterns of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China

TANG Li-Li¹, YANG Tong¹, LIU Hong-Yan², KANG Mu-Yi^{3,4}, WANG Ren-Qing⁵, ZHANG Feng⁶, GAO Xian-Ming⁷, YUE Ming⁸, ZHANG Mei¹, ZHENG Pu-Fan¹, and SHI Fu-Chen^{1*}

¹College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China; ²Institute of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; ³State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ⁴College of Resources Science & Technology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ⁵School of Life Sciences, Shandong University, Jinan 250100, China; ⁶Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; ⁷State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academic of Science, Beijing 100093, China; and ⁸Key Laboratory of Resource Biology and Biotechnology in Western China, Ministry of Education, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract

Aims To explore the factors controlling the spatial distribution, as well as the species diversity, of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China.

Methods We investigated the species composition and environments for 370 shrubland plots of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China. We calculated biodiversity indices (Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou's evenness index) and then applied multivariate regression trees (MRT), analysis of variance (ANOVA), Pearson correlation analysis to disentangle distribution of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* community and patterns of species diversity along both horizontal and elevational gradients.

Important findings The results showed that *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands distributed in a large area stretching for more than 10° of both latitude and longitude, together with an elevational range of more than 1 000 m (117 m to 1 248 m). The Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou's evenness index were higher in the herbaceous layer than those in the shrub layers. The species diversity of shrub layer increased with latitude

收稿日期Received: 2018-07-07 接受日期Accepted: 2018-10-29

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2011FY110300)、天津市农业农村委员会项目(ITTFPRS2018001)和天津市科学技术委员会项目(18ZXZYN00120)。Supported by the National Basic work of Science and Technology of China (2011FY110300), the Special Fund for the Industrial System Construction of Modern Agriculture of Tianjin, China (ITTFPRS2018001), and the Program of Science and Technology Commission Foundation of Tianjin, China (18ZXZYN00120).

* 通信作者Corresponding author (fshi@nankai.edu.cn)

but decreased with elevation. In contrast, that of the herbaceous layer decreased with latitude but increased with elevation. The Shannon-Wiener indexes of both layers were significantly correlated with environmental factors. The results of Pearson correlation analysis indicated that the Shannon-Wiener indexes of shrub layer had a significantly negative relationship with its temperature and slope position, and a significantly positive relationship with its precipitation. However, that of herb layer showed opposite trends.

Key words *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrubland; species diversity index; spatial pattern; plant community

Tang LL, Yang T, Liu HY, Kang MY, Wang RQ, Zhang F, Gao XM, Yue M, Zhang M, Zheng PF, Shi FC (2019). Distribution and species diversity patterns of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*), 隶属于马鞭草科牡荆属(*Vitex*)(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1993), 花期长、花量大, 花朵富含花蜜, 是华北地区著名的蜜源植物, 且其根系发达, 交织成网, 具有较强的耐旱及保持水土的能力(王晓蓓等, 2007; 张春霞, 2007)。华北地区降水相对较少且不均, 长久以来频繁的人为活动严重干扰到森林植被的完整性。荆条灌丛是森林植被破坏后生境干旱化情况下形成的次生群落(茹文明, 1993), 适应华北地区的生境条件, 在华北地区广泛分布。多年来, 荆条的研究主要涉及群落结构和生物量(戴晓兵, 1989; 茹文明, 1993; 聂二保, 2006; 聂二保等, 2009a, 2009b; 王煜倩和聂二保, 2009; 高明亮等, 2014; 程杰等, 2016), 水土保持及改良(王晓蓓等, 2007; 张春霞, 2007), 植被恢复以及小尺度下的空间分布差异(包昱峰等, 2008; 李晓宏, 2011)等, 而大尺度下荆条灌丛的分布格局、物种多样性的空间分异未见报道。

生境差异是植物群落空间分布格局的决定因素之一(Urban *et al.*, 2000), 荆条灌丛分布范围广泛, 所处生境空间异质性高, 是研究区域植被恢复中必不可少的演替阶段, 其在华北地区的分布区域繁杂多样, 不同区域中物种多样性和物种组成势必存在着一定的变化, 不同格局中生态系统结构、功能乃至生态过程也必将有所不同(Huston, 1997; Naeem & Li, 1997; Tilman, 2000; Hector *et al.*, 2002)。本文根据华北地区荆条灌丛的样方数据、地形图、温度、降水等信息, 重点分析华北地区荆条灌丛的水平和垂直分布规律及不同分布范围内的物种多样性, 并进一步探究环境因子如何影响荆条灌丛的物种多样性及分布格局。

1 材料和方法

1.1 研究区域

本文的研究区域是以华北地区为主, 同时包括

辽宁、山东、陕西、河南、甘肃、宁夏(图1)。该区域背依中国西北腹地, 南接长江中下游平原, 东临渤海。区内地势西北高、东南低, 海拔高度–7–5 578 m, 地形复杂多样, 包括高原、山地、丘陵、沟谷、盆地等。气候以温带大陆性气候为主, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干旱, 年平均气温8–13 °C, 年降水量400–1 000 mm, 其中西部降水量小且明显低于蒸发量。区内生态系统类型丰富多样, 涵盖山地森林、灌丛、草原、湿地等。

1.2 研究方法

1.2.1 外业调查

本文采用典型抽样法对华北地区荆条灌丛(荆条为主要优势种)进行调查, 共设置370个10 m × 10 m的样方(图1), 分布于北京、天津、河北、河南、山东、山西、陕西等省份, 南北纬度跨越10°, 海拔高度跨越1 000 m以上。样方设置方法参照方精云等(2009)的植物群落清查的技术规范, 在荆条灌丛分布的典型地段设置样方, 记录样方内所有草本维管束植物和基径≥0.1 cm的木本植物的相关信息, 包括种类、多度及样方地理坐标、海拔、坡度、坡向等。

图1 华北地区荆条灌丛研究区域和样方分布点。

Fig. 1 Study area and plot sites of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China.

1.2.2 数据处理

1.2.2.1 空间分布格局 根据调查的位点及华北地区高程数据图, 采用多元回归树(MRT)的方法, 通过经度、纬度、海拔、坡度、坡向、坡位分析华北地区荆条灌丛的分布格局, 其中坡向按照1-8的等级分别代表北、东北、西北、东、西、东南、西南、南坡, 坡位按照1-6分别代表谷地、下、中下、中、中上和上坡位。分类过程中在“最小的误差±相应标准差”的范围内选择了最小的聚类树, 通过R语言软件(版本2.2.0)的“mvpart”(Therneau & Atkinson, 2014)程序包进行此分类过程。

1.2.2.2 重要值计算 以每个空间分布格局的荆条灌丛群落为一个独立单元, 分别计算灌木、草本层的重要值(IV)。IV的计算方法多样, 本研究采用大多数学者使用的计算方法:

$$IV_{\text{灌木层}} = (\text{相对多度} + \text{相对显著度} + \text{相对频度}) \times 100/3$$

$$IV_{\text{草本层}} = (\text{相对多度} + \text{相对显著度}) \times 100/2$$

$$\text{相对多度} = (\text{某个物种多度} / \text{所有种多度}) \times 100\%$$

$$\text{灌木相对显著度} = (\text{某一物种的基径面积之和} / \text{全部种的基面积之和}) \times 100\%$$

$$\text{草本相对显著度} = (\text{某一物种的盖度} / \text{全部种的盖度之和}) \times 100\%$$

$$\text{相对频度} = (\text{某一物种的频度} / \text{全部种的频度之和}) \times 100\%$$

计算过程在R语言软件中进行。

1.2.2.3 物种多样性指数计算 灌木层、草本层的物种多样性指数以重要值作为测度依据, 具体计算方法:

$$\text{Shannon-Wiener指数: } H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Simpson指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Pielou均匀度指数: } J = \left(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \right) / \ln S$$

其中, S 为样地内所有物种数目, P_i 为样地内种 i 的重要值。

1.2.2.4 环境因子与生物多样性相关分析 在WorldClim网站中获取环境温度、降水环境因子, 并利用R语言软件中(版本3.3.1)的“raster”(Robert, 2016)程序包提取荆条灌丛分布点的环境因子, 在R

语言软件(版本3.3.1)“ecospat”(Olivier *et al.*, 2017)程序包下分析19个生物气候学因子共线性, 筛选可用的环境因子。随后在R 3.3.1中的“vegan”(Jari *et al.*, 2017)程序包下进行Pearson相关分析, 定量分析温度、降水对华北地区荆条灌丛物种多样性的影响, 以Shannon-Wiener指数为主。

2 结果

2.1 华北地区荆条灌丛水平、垂直分布格局

根据多元回归树(MRT)分类结果(图2), 华北地区荆条灌丛以纬度和海拔分为5类, 体现出此区域荆条灌丛的水平和垂直分布带。水平分布带上, 华北地区荆条灌丛主要可分为高、中、低纬度3个地理分布区。其中高纬度地区包括193个样方(纬度在39.53° N以北的荆条灌丛), 主要集中在北京、天津、河北等地(群丛1: 荆条+北京隐子草(*Cleistogenes hancei*)); 低纬度地区包括138个样方(纬度在37.3° N以南的荆条灌丛), 主要集中在山东、山西、河南、陕西等地(群丛5: 荆条+阿拉伯黄背草(*Themeda triandra*))。中纬度地区包括39个样方(纬度介于37.3°–39.53° N之间), 主要集中在山东、山西等地(群丛2: 荆条+白羊草(*Bothriochloa ischaemum*), 群丛3: 荆条+中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*), 群丛4: 荆条+披针藎草(*Carex lancifolia*))。

根据MRT结果(图2), 在中纬度地区可主要以海拔作为划分标准, 分出垂直分布带, 包括3个海拔梯度。其中, 高海拔地区包括山西等地海拔在401.5 m以上的荆条灌丛, 最高海拔可至1 248 m, 共有14个样方(群丛4); 低海拔地区则是山东、山西等地海拔低于249 m的荆条灌丛, 最低海拔为117 m, 共有17

图2 华北荆条灌丛多元回归树分类。Lat, 纬度(° N); Ele, 海拔(m); n , 样方量。

Fig. 2 Classification of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China. Lat, latitude (° N); Ele, elevation (m); n , the number of plots.

个样方(群丛2)。海拔介于249–401.5 m之间的则为中海拔地区, 主要分布于山西省, 共有样方8个(群丛3)。

荆条在各群丛中都是建群种, 具有绝对优势, 灌木层伴生种多以酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等为主; 林下草本层以禾本科、菊科植物为主要优势种, 包括北京隐子草、白羊草、披针藁草、阿拉伯黄背草、碱菀(*Tripolium vulgare*)、猪毛菜(*Salsola collina*)和野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等(表1)。

2.2 华北地区荆条灌丛物种多样性水平、垂直分异规律

本次共调查到植物种类537种, 其中灌木109种, 以豆科和蔷薇科为主; 草本428种, 以禾本科、菊科等为主。在高、中、低纬度的3个水平区中, 随着纬度的降低, 荆条灌丛灌木层的*H*和*D*有所降低, 而在

草本层其值则有所升高, 且其在灌木层均小于草本层(表2; 图3)。但*J*则在中纬度地区的荆条灌丛较高, 南、北荆条灌丛灌木层和草本层的均匀度指数均较低(表2; 图3)。

垂直分布带上, 随着海拔的升高, 荆条灌丛灌木层的*H*有所降低, 而在草本层其值有所升高, 且在灌木层其值均小于草本层(表3; 图3); 灌木层*D*和*J*随着海拔的升高先降低再升高, 草本层的*D*则持续升高, 而草本层的*J*呈先升高再降低的趋势(表3; 图3)。

2.3 不同分布格局中温度、降水的异同

通过共线性结果(附录I、II), 筛选出环境因子 BIO3、BIO5、BIO15、BIO18这4个生物气候学因子代表该地区的温度和降水。其中BIO3和BIO5代表温度因子, BIO15和BIO18代表降水因子。

表1 华北荆条群丛优势物种
Table 1 Dominant species of five *Vitex negundo* var. *heterophylla* associations in North China

重要值排序 Order of important value	灌木层 Shrub layer					草本层 Herb layer				
	群丛1 Association 1	群丛2 Association 2	群丛3 Association 3	群丛4 Association 4	群丛5 Association 5	群丛1 Association 1	群丛2 Association 2	群丛3 Association 3	群丛4 Association 4	群丛5 Association 5
1	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	北京隐子草 <i>Cleistogenes hancei</i>	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	披针藁草 <i>Carex lancifolia</i>	阿拉伯黄背草 <i>Themeda triandra</i>
2	雀儿舌头 <i>Leptopus chinensis</i>	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i>	黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	披针藁草 <i>Carex lancifolia</i>	针茅 <i>Stipa capillata</i>	北京隐子草 <i>Cleistogenes hancei</i>	早熟禾 <i>Poa annua</i>	北京隐子草 <i>Cleistogenes hancei</i>
3	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	兴安胡枝子 <i>Lespedeza daurica</i>	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	红花锦鸡儿 <i>Caragana rosea</i>	多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i>	碱菀 <i>Tripolium vulgare</i>	北京隐子草 <i>Cleistogenes hancei</i>	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	碱菀 <i>Tripolium vulgare</i>	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>
4	小叶朴 <i>Celtis bungeana</i>	红花锦鸡儿 <i>Caragana rosea</i>	薄皮木 <i>Leptodermis oblonga</i>	蚂蚱腿子 <i>Myrica dioica</i>	白刺花 <i>Sophora davidii</i>	大油芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i>	矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i>	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	羊须草 <i>Carex cal-litrichos</i>
5	山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	多花木蓝 <i>Indigofera amblyantha</i>	三裂绣线菊 <i>Spiraea trilobata</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	丛生隐子草 <i>Cleistogenes caespitosa</i>	臭草 <i>Melica scabrosa</i>	山蒿 <i>Artemisia brachyloba</i>	萵草 <i>Arthraxon hispidus</i>

表2 华北不同纬度带荆条灌丛物种多样性指数
Table 2 Biodiversity indices of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in different latitudinal zones in North China

纬度 Latitude	灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer		
	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J</i>
高(群丛1) High (Association 1)	0.848	3.159	0.194	0.928	3.452	0.167
中(群丛2、3、4) Middle (Association 2, 3, 4)	0.826	2.240	0.298	0.884	2.690	0.231
低(群丛5) Low (Association 5)	0.821	3.386	0.167	0.975	4.324	0.169

H, Shannon-Wiener指数; *D*, Simpson指数; *J*, 均匀度指数。
H, Shannon-Wiener index; *D*, Simpson index; *J*, Pielou index.

表3 华北不同垂直带荆条灌丛物种多样性指数
Table 3 Biodiversity indices of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in different elevational zones in North China

海拔 Elevation	灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer		
	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J</i>
高(群丛4) High (Association 4)	0.796	2.246	0.275	0.928	3.099	0.207
中(群丛3) Middle (Association 3)	0.832	2.041	0.347	0.892	2.617	0.268
低(群丛2) Low (Association 2)	0.847	2.434	0.274	0.834	2.353	0.217

H, Shannon-Wiener指数; *D*, Simpson指数; *J*, 均匀度指数。
H, Shannon-Wiener index; *D*, Simpson index; *J*, Pielou index.

图3 华北地区不同纬度带和海拔带荆条灌丛生物多样性指数分布图。

Fig. 3 Biodiversity indices of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in different latitudinal and elevational zones in North China.

通过单因素方差分析(表4)可知,各分布带的温度、降水有显著性差异($p < 0.05$)。在水平分布带上,BIO3和BIO5这两个温度因子在中、低纬度地区(群丛5、2、3、4)上差异显著性不高,但在高纬度地区差异显著(群丛1, $p < 0.05$);降水因子中BIO15在高、中、低纬度地区差异显著($p < 0.05$),而BIO18这一降水因子的纬度上差异不显著($p > 0.05$)。在垂直分布带上(群丛2、3、4),温度因子BIO3和降水因子BIO18在低、中海拔地区间差异不显著($p > 0.05$),但与其与高海拔地区间差异显著($p < 0.05$);而温度因子BIO5在高、中、低海拔地区间差异显著($p < 0.05$);降水因子BIO15在垂直格局上差异不显著($p > 0.05$)。

2.4 水热及地形因子对荆条灌丛物种多样性的影响

根据物种多样性指数与环境因子相关分析结果(表5)可知,灌木层、草本层的 H 与环境因子有一定的相关性,包括温度、降水和地形因子。对灌木层而言, H 与坡度呈显著正相关关系($p < 0.01$),与BIO3、BIO15、海拔、坡位呈显著负相关关系($p < 0.01$),其中温度和降水因子与 H 相关性较大。草本层 H 与BIO3、BIO18、海拔、坡位呈显著正相关关系($p < 0.01$),与BIO5、BIO15呈显著负相关关系(BIO5: $p < 0.05$, BIO15: $p < 0.01$),与降水因子的相关性较大。由此可知,荆条灌丛的 H 与温度、降水的相关性较大,随着温度升高灌木层多样性降低,但随着降水增加多样性增加,草本层反之。地形因子与其相关性相对较小,且灌木层 H 指数与地形因子多呈负相关关系,即随着海拔、坡位升高多样性降低;草本层 H 与地形因子多呈正相关关系,即随着

表4 华北地区荆条灌丛不同分布区环境因子单因素方差分析(平均值±标准误差)

Table 4 ANOVA of environmental variables of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in different latitudinal and elevational zones in North China (mean ± SE)

群丛 Association	BIO3	BIO5	BIO15	BIO18
1	28.08 ± 0.05 ^c	30.01 ± 0.07 ^c	129.44 ± 0.47 ^a	378.50 ± 2.58 ^{ab}
2	28.50 ± 0.37 ^b	32.24 ± 0.29 ^a	114.50 ± 1.28 ^b	351.18 ± 2.60 ^b
3	29.11 ± 0.16 ^b	31.15 ± 0.16 ^b	113.09 ± 0.79 ^b	345.25 ± 7.25 ^b
4	30.58 ± 0.24 ^a	28.29 ± 0.30 ^d	110.32 ± 1.54 ^b	293.21 ± 6.73 ^c
5	28.90 ± 0.14 ^b	30.41 ± 0.14 ^{bc}	95.83 ± 1.49 ^c	402.91 ± 6.41 ^a

同一列数据不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。BIO3, 等温性; BIO5, 最热月份最高气温; BIO15, 降水量季节变异系数; BIO18, 最热季度降水量。Different lowercase letters indicate significant differences among different formation ($p < 0.05$). BIO3, isothermality; BIO5, max temperature of warmest month; BIO15, precipitation seasonality (coefficient of variation); BIO18, precipitation of warmest quarter.

表5 华北地区荆条灌丛物种多样性与环境因子相关性检验

Table 5 Pearson correlation between species diversity and environmental factors of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China

环境因子 Variables	灌木层物种多样性 Biodiversity indices of the shrub layer	草本层物种多样性 Biodiversity indices of the herbaceous layer
	相关系数 Correlation coefficient	相关系数 Correlation coefficient
BIO3	-0.41**	0.14**
BIO5	0.07	-0.13*
BIO15	0.69**	-0.51**
BIO18	-0.02	0.27**
ELE	-0.37**	0.22**
ASP	-0.06	0.10
SLO	0.34**	-0.08
SLOP	-0.17**	0.28**

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. BIO3, 等温性; BIO5, 最热月份最高气温; BIO15, 降水量季节变异系数; BIO18, 最热季度降水量; ASP, 坡向; Ele, 海拔; SLO, 坡度; SLOP, 坡位。

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. BIO3, isothermality; BIO5, max temperature of warmest month; BIO15, precipitation seasonality (coefficient of variation); BIO18, precipitation of warmest quarter; ASP, aspect; Ele, elevation; SLO, slope; SLOP, slope position.

海拔、坡位升高多样性升高。

3 讨论

3.1 华北地区荆条灌丛的分布

根据本文研究结果,华北地区荆条灌丛分布广泛,且生境多样。除山东半岛外,华北地区荆条灌丛整体上主要分布于我国第一阶梯与第二阶梯交接的位置,分布的纬度从32° N跨越到42° N,海拔从70 m升至1 497 m。生境条件复杂多样,这与荆条极强的适应性密不可分,纬度、海拔的大尺度跨越会导致其生境的温度、水分存在较大差异,但荆条对温度、水分等具有极强的适应能力,能在复杂多样的生境中生存(温阳等, 2006; 刘媛媛和周广柱, 2011; 程杰等, 2016)。

根据MRT分类结果(图1)可知,纬度、海拔是划分华北地区荆条灌丛分布带的重要因素,且生境异质性导致的水热差异在一定程度上影响了各分布区中灌丛物种丰富度和物种组成,这也是影响众多群落分布的主要原因(徐远杰等, 2010; 何艳华等, 2013; 陈云等, 2014; Yang *et al.*, 2016)。本文关注的荆条灌丛,是天然植被在受到人为破坏后,逐步从蒿类+禾本科植物到蒿类+锦鸡儿灌丛,最后发育而成(Li *et al.*, 2008)。因此人为活动可能是华北地区荆条灌丛分布及物种多样性形成的另一方面原因。尤其是在水平分布带上。低纬度地区的荆条灌丛主要集中在山西、河南、陕西等地,且多分布于山地等地形多样、生境复杂的生境中,该地区人类活动不易,很可能荆条灌丛的形成较晚,还在逐步从草丛发育到灌丛的阶段,这也解释了低纬度地区草本层物种丰富度较高、灌木层物种丰富度较低。而高纬度地区的荆条灌丛主要集中在北京、天津、河北等政治行政中心,人类活动密集,开发历史悠久,很可能该区域荆条灌丛的形成较早,已经处于发育成熟阶段,也是高纬度地区草本层物种丰富度较低、灌木层物种丰富度较高的原因。

3.2 华北地区荆条灌丛生物多样性空间分异

华北地区荆条灌丛不同分布区的物种多样性呈一定的水平、垂直梯度变化,与冷杉(*Abies fabri*)群落灌木层物种丰富度会随着纬度和海拔的改变呈现规律性变化的结论(沈泽昊等, 2004)一致。

在水平分布带上,随着纬度的降低,灌木层物种丰富度(*H*)、分布的均匀性(*D*)降低,草本层物种

丰富度、分布的均匀性增加,但物种种类的均匀度(*J*)在中纬度地区更高,不呈纬度性变化。在垂直分布带上,随着海拔的升高,灌木层物种丰富度降低,草本层物种丰富度有所升高,这与大多数研究结果一致,高海拔地区草本物种更加丰富(Le Brocque & Buckney, 2003; Li *et al.*, 2009; Blanck *et al.*, 2011; Mod *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016)。

3.3 华北荆条灌丛物种多样性的影响因素

物种多样性受诸多因素影响,在大尺度下,纬度不同所带来的气候差异是多样性变化的最主要原因(Rosenzweig, 1995; Allen *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2017),多个研究表明,随着纬度的降低,物种多样性增加(Niklas *et al.*, 2003; Willig *et al.*, 2003)。小尺度下,海拔、土壤的营养成分、土壤含水量、物种本身的一些功能属性等都是物种多样性变化的原因,研究表明随着海拔的增高物种多样性降低,土壤因子和植物功能属性则对多样性有不同程度的影响(North *et al.*, 2005; Bobbink *et al.*, 2010; 徐远杰等, 2010; Swenson *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016)。

本文显著性和相关分析结果显示,纬度不同所带来的温度、降水的显著差异对研究区域内荆条灌丛的物种多样性具有较为重要的影响;同时海拔、坡度、坡位等地形因子导致的微气候的差异对其物种多样性也有一定的影响。研究中环境因子对灌木层和草本层的影响基本呈相反的趋势,即环境因子如果导致灌木层物种丰富度降低则会导致草本层物种丰富度增加,这与大多数研究结果(何艳华等, 2013; 陈云等, 2014; 金慧等, 2015)一致,很可能与灌木层盖度、灌丛空隙、气候和土壤条件等有关(武宇佼等, 2015; 张树斌等, 2018)。

参考文献

- Allen AP, Brown JH, Gillooly JF (2002). Global biodiversity, biochemical kinetics, and the energetic-equivalence rule. *Science*, 297, 1545–1548.
- Bao YF, Gao JR, He MY, Zhang JR (2008). Study on age structure of *Vitex negundo* community in Miyun Reservoir watershed. *Forest Resources Management*, (6), 67–70. [包昱峰, 高甲荣, 何明月, 张金瑞 (2008). 密云水库集水区荆条灌丛年龄结构研究. *林业资源管理*, (6), 67–70.]
- Blanck YL, Gowda J, Mårtensson LM, Sandberg J, Fransson AM (2011). Plant species richness in a natural Argentinian matorral shrub-land correlates negatively with levels of plant phosphorus. *Plant and Soil*, 345, 11–21.
- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R,

- Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, de Vries W (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis. *Ecological Applications*, 20, 30–59.
- Chen Y, Wang HL, Han JW, Wei BL, Jia HR, Ye YZ, Yuan ZL (2014). Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqinling. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2068–2075. [陈云, 王海亮, 韩军旺, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠, 袁志良 (2014). 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局. *生态学报*, 34, 2068–2075.]
- Cheng J, Liu YH, Zhang JE (2016). The distribution and growth trait of *Vitex negundo* shrub in the loess region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30, 348–352. [程杰, 刘永辉, 张金娥 (2016). 黄土区荆条灌丛分布与生长特征. *水土保持学报*, 30, 348–352.]
- Dai XB (1989). The seasonal dynamics of the biomass of *Vitex* shrubland in mountainous area of Huairou County in Beijing. *Acta Botanica Sinica*, 31, 307–315. [戴晓兵 (1989). 怀柔山区荆条灌丛生物量的季节动态. *植物学报*, 31, 307–315.]
- Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences (1993). *Flora of China*. Vol. 65(1). Science Press, Beijing. [中国科学院中国植物志编辑委员会 (1993). 中国植物志. 第65卷1册. 科学出版社, 北京.]
- Fang JY, Wang XP, Shen ZH, Tang ZY, He JS, Yu D, Jiang Y, Wang ZH, Zheng CY, Zhu JL, Guo ZD (2009). Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 17, 533–548. [方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪 (2009). 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 17, 533–548.]
- Gao ML, Gong ZN, Zhao WJ, Gao Y, Hu D (2014). The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1178–1188. [高明亮, 宫兆宁, 赵文吉, 高阳, 胡东 (2014). 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究. *生态学报*, 34, 1178–1188.]
- He YH, Yan M, Zhang QD, Zhang ZF, Miao YM, Bi RC (2013). Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 2452–2462. [何艳华, 闫明, 张钦弟, 张直峰, 苗艳明, 毕润成 (2013). 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局. *生态学报*, 33, 2452–2462.]
- Hector A, Bazeley-White E, Loreau M, Otway S, Schmid B (2002). Overyielding in grassland communities: Testing the sampling effect hypothesis with replicated biodiversity experiments. *Ecology Letters*, 5, 502–511.
- Huston MA (1997). Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 110, 449–460.
- Jari O, Guillaume FB, Michael F, Roeland K, Pierre L, Dan M, Peter RM, O'Hara RB, Gavin LS, Peter S, Henry HSM, Eduard S, Helene W (2017). vegan: Community ecology package. R package version 2.4-3. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Cited: 2018-07-07
- Jin H, Zhao Y, Zhao W, Yin H, Qin LW, Cui KF, Li XJ, Huang XT (2015). Elevational changes in species diversity and similarity analysis of a *Rhododendron chrysanthum* community on Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 125–133. [金慧, 赵莹, 赵伟, 尹航, 秦立武, 崔凯峰, 李晓杰, 黄祥童 (2015). 长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性. *生态学报*, 35, 125–133.]
- le Brocq AF, Buckney RT (2003). Species richness-environment relationships within coastal sclerophyll and mesophyll vegetation in Ku-ring-gai Chase National Park, New South Wales, Australia. *Austral Ecology*, 28, 404–412.
- Li SQ, Yang BS, Wu DM (2008). Community succession analysis of naturally colonized plants on coal gob piles in Shanxi mining areas, China. *Water Air & Soil Pollution*, 193, 211–228.
- Li XH (2011). *The Research of Distribution Pattern of Vitex negundo Shrub in the Watershed of Miyun Reservoir*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [李晓宏 (2011). 密云水库集水区荆条灌丛分布格局的研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Li XR, Tan HJ, He MZ, Wang XP, Li XJ (2009). Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: Prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 52, 669–680.
- Liu YY, Zhou GZ (2011). Study on drought resistance of three shrub tree species. *Northern Horticulture*, (8), 88–90. [刘媛媛, 周广柱 (2011). 干旱胁迫条件下三种灌木抗旱特性研究. *北方园艺*, (8), 88–90.]
- Mod HK, Heikkinen RK, le Roux PC, Wisz MS, Luoto M (2016). Impact of biotic interactions on biodiversity varies across a landscape. *Journal of Biogeography*, 43, 2412–2423.
- Naeem S, Li SB (1997). Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 390, 507–509.
- Nie EB (2006). *Study on Quantitative Ecology of Vitex negundo L. var. heterophylla (Franch) Communities in Canyon District of Taihang Mountains, in the southern Shanxi, China*. Master degree dissertation, Shanxi University, Taiyuan. [聂二保 (2006). 山西太行山南段峡谷区荆条灌丛数量生态学研究. 硕士学位论文, 山西大学, 太原.]
- Nie EB, Wang YQ, Zhang JT (2009a). Interspecific relationships of *Vitex negundo* var. *heterophylla* community of

- Taihang Mountain in Shanxi Province. *Pratacultural Science*, 26(10), 24–29. [聂二保, 王煜倩, 张金屯 (2009a). 山西太行山峡谷区荆条灌丛种间连接性研究. 草业科学, 26(10), 24–29.]
- Nei EB, Wang YQ, Zhang JT (2009b). Study on the diversity of *Vitex negundo* var. *heterophylla* community in Taihang Mountain of Shanxi Province. *Pratacultural Science*, 26(6), 6–10. [聂二保, 王煜倩, 张金屯 (2009b). 山西太行山峡谷区荆条灌丛物种多样性研究. 草业科学, 26(6), 6–10.]
- Niklas KJ, Midgley JJ, Rand RH (2003). Size-dependent species richness: Trends within plant communities and across latitude. *Ecology Letters*, 6, 631–636.
- North M, Oakley B, Fiegener R, Gray A, Barbour M (2005). Influence of light and soil moisture on Sierran mixed-conifer understory communities. *Plant Ecology*, 177, 13–24.
- Olivier B, Valeria DC, Antoine G (2017). *ecospat*: Spatial ecology miscellaneous methods. R package version 2.2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ecospat>.
- Robert JH (2016). *raster*: Geographic data analysis and modeling. R package version 2.5-8. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Rosenzweig ML (1995). *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ru WM (1993). The community structure of *Vitex negundo* var. *heterophylla* (Franch) Rehd scrub and its biomass in mountainous area of Lingchuan County Shanxi Province. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, (S2), 55–58. [茹文明 (1993). 陵川山区荆条灌丛群落结构与生物量的研究. 山西师大学报(自然科学版), (S2), 55–58.]
- Shen ZH, Liu ZL, Fang JY (2004). Altitudinal changes in species diversity and community structure of *Abies fabri* communities at Hailuo Valley of Mt. Gongga, Sichuan. *Biodiversity Science*, 12, 237–244. [沈泽昊, 刘增力, 方精云 (2004). 贡嘎山海螺沟冷杉群落物种多样性与群落结构随海拔的变化. 生物多样性, 12, 237–244.]
- Swenson NG, Weiser MD, Mao LF, Normand S, Rodríguez MÁ, Lin LX, Cao M, Svenning JC (2016). Constancy in functional space across a species richness anomaly. *The American Naturalist*, 187, 83–92.
- Therneau TM, Atkinson B (2014). *mvpart*: Multivariate partitioning. R package version 1.6-1. https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/mvpart/mvpart_1.6-1.tar.gz.
- Tilman D (2000). Causes, consequences and ethics of biodiversity. *Nature*, 405, 208–211.
- Urban DL, Miller C, Halpin PN, Stephenson NL (2000). Forest gradient response in Sierran landscapes: The physical template. *Landscape Ecology*, 15, 603–620.
- Wang XB, Han LB, Liu CX (2007). Experiments on germination of seeds of *Vitex negundo* var. *Heterophylla*—A superior shrub for soil and water conservation. *Liaoning Forestry Science and Technology*, (4), 30–32. [王晓蓓, 韩烈保, 刘春霞 (2007). 优良水土保持灌木——野生荆条种子发芽实验研究. 辽宁林业科技, (4), 30–32.]
- Wang YQ, Nie EB (2009). Quantitative analysis of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* communities in Taihang Mountain, Shanxi Province. *Pratacultural Science*, 26(11), 32–36. [王煜倩, 聂二保 (2009). 山西太行山南段峡谷区荆条灌丛数量分析. 草业科学, 26(11), 32–36.]
- Wen Y, Yang WB, Yan SX, Wang JY, Yan DR (2006). Comparison of resistance of 8 kinds of local tree species. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(4), 204–208. [温阳, 杨文彬, 阎栓喜, 王晶莹, 阎德仁 (2006). 8个乡土树种抗逆性对比研究. 干旱区资源与环境, 24(4), 204–208.]
- Willig MR, Kaufman DM, Stevens RD (2003). Latitudinal gradients of biodiversity: Pattern, process, scale, and synthesis. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 34, 273–309.
- Wu YJ, Miao YM, Bi RC (2015). Herbaceous plant species diversity and regeneration in shrub gaps in Huoshan Mountain of Shanxi Province. *Plant Diversity and Resources*, 37, 203–208. [武宇佼, 苗艳明, 毕润成 (2015). 山西霍山灌丛空隙草本植物物种多样性与更新. 植物分类与资源学报, 37, 203–208.]
- Xu M, Ma L, Jia Y, Liu M (2017). Integrating the effects of latitude and altitude on the spatial differentiation of plant community diversity in a mountainous ecosystem in China. *PLOS ONE*, 12, e0174231. DOI: 10.1371/journal.pone.0174231.
- Xu YJ, Chen YN, Li WH, Fu AH, Ma XD, Gui DW, Chen YP (2010). Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1142–1154. [徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏 (2010). 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释. 植物生态学报, 34, 1142–1154.]
- Yang Y, Han J, Liu Y, Zhong YC, Shi S, Sina C, Xu Y, Ying L, Zhang W, Shen Z (2016). A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan. *Biodiversity Science*, 24, 440–452.
- Zhang CX (2007). *Study on Bioecological Characteristics of Soil and Water Conservation Shrub—Vitex negundo*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [张春霞 (2007). 水土保持灌木——荆条的生物生态学特性初步研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Zhang SB, Wang XP, Wu P, Sun H, Li QY, Wu YL, Han W, Wu X. (2018). Relationship between shrub species diversity and climate and local environmental factors across

Jilin. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 7990–8000. [张树斌, 王襄平, 生态学报, 38, 7990–8000]
吴鹏, 孙晗, 李巧燕, 吴玉莲, 韩威, 武娴 (2018). 吉林
灌木群落物种多样性与气候和局域环境因子的关系. 责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 李 敏 实习编辑: 赵 航

附录I 19个生物气候学因子共线性分析

Supplement I Correlations among the 19 bioclimatic variables

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2018.0162-S1.pdf>

附录II 筛选出的4个生物气候学因子共线性分析

Supplement II Correlations among the 4 selected bioclimatic variables

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2018.0162-S2.pdf>

唐丽丽, 杨彤, 刘鸿雁, 康慕谊, 王仁卿, 张峰, 高贤明, 岳明, 张梅, 郑璞帆, 石福臣 (2019). 华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律. 植物生态学报, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

Tang LL, Yang T, Liu HY, Kang MY, Wang RQ, Zhang F, Gao XM, Yue M, Zhang M, Zheng PF, Shi FC (2019). Distribution and species diversity patterns of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

<http://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2018.0162>

附录I 19个生物气候学因子共线性分析

Supplement I Correlations among the 19 bioclimatic variables

根据共线性分析结果, 筛选出BIO3、BIO5、BIO15、BIO18(共线性低于0.6)与物种多样性指数(H')进行相关性分析。19个生物气候学因子(BIO1–BIO19)分别是年平均气温、昼夜温差月均值、等温性、气温季节变化方差、最热月份最高气温、最冷月份最低气温、年气温变化范围、最湿季度平均气温、最干季度平均气温、最热季度平均气温、最冷季度平均气温、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量季节变异系数、最湿季度降水量、最干季度降水量、最热季度降水量和最冷季度降水量。

According to the correlation results, we chose BIO3, BIO5, BIO15 and BIO18 (correlation values less than 0.6) to implement pearson correlation analysis with species diversity (H'). 19 bioclimatic variables (BIO1–BIO19) are annual mean air temperature, mean diurnal range, isothermality, air temperature seasonality, max air temperature of warmest month, min air temperature of coldest month, air temperature annual range, mean air temperature of wettest quarter, mean air temperature of driest quarter, mean air temperature of warmest quarter, mean air temperature of coldest quarter, annual precipitation, precipitation of wettest month, precipitation of driest month, precipitation seasonality, precipitation of wettest quarter, precipitation of driest quarter, precipitation of warmest quarter and precipitation of coldest quarter.

唐丽丽, 杨彤, 刘鸿雁, 康慕谊, 王仁卿, 张峰, 高贤明, 岳明, 张梅, 郑璞帆, 石福臣 (2019). 华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律. 植物生态学报, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

Tang LL, Yang T, Liu HY, Kang MY, Wang RQ, Zhang F, Gao XM, Yue M, Zhang M, Zheng PF, Shi FC (2019). Distribution and species diversity patterns of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 825–833. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0162

<http://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2018.0162>

附录II 筛选出的4个生物气候学因子共线性分析

Supplement II Correlations among the selected 4 bioclimatic variables

4个生物学气候因子间共线性均不高于0.6。BIO3, 等温性; BIO5, 最热月份最高气温; BIO15, 降水量季节变异系数; BIO18, 最热季度降水量。

Correlation values among these 4 variables were less than 0.6. BIO3, isothermality; BIO5, max air temperature of warmest month; BIO15, precipitation seasonality; BIO18, precipitation of warmest quarter.