

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2017.10056

黄治昊, 周鑫, 张孝然, 蒲真, 邢韶华. 北京地区黄檗分布与环境因子的关系[J]. 植物科学学报, 2017, 35(1): 56-63

Huang ZH, Zhou X, Zhang XR, Pu Z, Xing SH. Relationship between the distribution of *Phellodendron amurense* and environmental factors in the Beijing area[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(1): 56-63

北京地区黄檗分布与环境因子的关系

黄治昊, 周鑫, 张孝然, 蒲真, 邢韶华*

(北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

摘要: 黄檗 (*Phellodendron amurense* Rupr.) 为我国二级重点保护野生植物, 在北京地区黄檗多散生于阔叶林中, 数量稀少。为了解北京地区黄檗分布与环境因子的关系, 促进种群扩繁, 在北京百花山、松山和雾灵山自然保护区共设置了 12 个 20 m × 20 m 的样地, 利用 CCA 分析方法对不同地点黄檗的生长分布状况与海拔、坡度、坡向、郁闭度、土壤 pH 值、碱解氮和土壤有机质等 11 个环境因子的关系进行了分析。结果显示, CCA 排序第一轴主要反映了海拔、郁闭度和坡度的变化, 第二轴主要反映了有机质含量、碱解氮含量、pH 值和坡向的变化, 其中海拔、碱解氮和土壤有机质是影响黄檗生长分布的重要环境因子, 低海拔、低碱解氮含量以及土壤有机质高的地段适宜黄檗分布。对影响黄檗分布的环境因子进行定量分离, 结果发现环境因子对黄檗样地物种分布的解释能力为 84.5%, 显示出较好的排序效果, 黄檗分布点受人为干扰较少, 其所在植物群落与环境保持了良好的对应关系; 环境因子与物种分布呈显著相关 ($P = 0.03$), 表明 CCA 排序结果可以解释环境因子对物种分布的影响程度。

关键词: 黄檗; 环境因子; CCA 排序; 环境解释; 北京地区

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)01-0056-08

Relationship between the distribution of *Phellodendron amurense* and environmental factors in the Beijing area

Huang Zhi-Hao, Zhou Xin, Zhang Xiao-Ran, Pu Zhen, Xing Shao-Hua*

(College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Amur cork (*Phellodendron amurense* Rupr.) is listed as a second-class protected plant, and is found in small populations of scattered broad-leaved forests in the Beijing area. A total of 12 plots (20 m × 20 m) were set up in Baihuashan, Songshan, and Wulingshan Nature Reserves in Beijing to understand the relationship between the distribution of *P. amurense* and environmental factors in Beijing and to promote population development. The CCA method was used to analyze the effects of different locations, and the relationship between the growth and distribution of *P. amurense* and 11 environmental factors such as altitude, slope, aspect, canopy density, soil pH, soil available N, and soil organic matter. Results showed that the first axis of the CCA ordination diagram mainly reflected changes in altitude, canopy density, and slope, whereas, the second axis mainly reflected changes in organic matter content, nitrogen content, pH value, and slope. Thus, altitude, soil available N, and soil organic matter are important environmental factors that influence Amur cork distribution, and areas with low

收稿日期: 2016-05-17, 退修日期: 2016-05-31。

基金项目: 北京林业大学青年教师科学研究中长期项目 (2015ZCQ-BH-02); 北京市科技计划项目 (Z121100000312107)。

This work was supported by grants from the Long-term Scientific Research Project for Young Teachers of Beijing Forestry University (2015ZCQ-BH-02) and Beijing Science and Technology Project (Z121100000312107)。

作者简介: 黄治昊 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物多样性保护与利用 (E-mail: 191650127@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: steelboy78@163.com)。

altitude, low soil available N and high soil organic matter are suitable for its growth. Quantitative analysis of the influence of environmental factors on species distribution showed they had a good ability to explain *P. amurense* distribution (84.5%) and a good sorting effect, suggesting that the distribution of amur cork in the sample spots was strongly affected by the studied environmental factors. The plant community also showed a corresponding relationship with areas exhibiting less human interference. There was a significant correlation between environmental factors and species distribution ($P = 0.03$), which strengthened the reliability of the results.

Key words: Amur cork; Environmental factors; Canonical correspondence analysis (CCA); Environmental interpretation; Beijing area

黄檗 (*Phellodendron amurense* Rupr.) 别名黄波櫟、黄柏, 是芸香科黄檗属落叶乔木, 主产我国东北和华北各省。20 世纪 80 – 90 年代野生黄檗资源遭受严重人为破坏而急剧减少, 1987 年出版的《中国珍稀濒危保护植物名录》(第 1 册) 将黄檗定为渐危种, 1999 年国家公布的《国家重点保护野生植物名录》(第一批) 中将其列为 II 级重点保护植物, 2008 年崔国发等对北京地区野生植物进行濒危等级评定时将其定为容易消失种^[1], 因此开展黄檗的生态学研究进而为黄檗种群的野外保护与恢复提出科学建议显得十分必要。近年来, 有关黄檗的研究多集中在药用成分分析^[2,3]、药用成分提取和药效学^[4–6]等方面, 在人工栽培繁育技术等方面的研究^[7,8]也有较多报道, 而在黄檗生态学研究, 尤其是微生境与其生长分布关系的研究方面报道较少, 张阳^[9]对我国野生黄檗活性成分与生态因子之间的相关性进行了研究, 但未涉及生态因子对黄檗生长与分布的影响, 李静贤^[1]从不同海拔、坡度、坡向和坡位上的数量分布情况对北京山区黄檗数量特征进行了研究, 提出了适宜分布的生境因子, 而对于这些因子的影响程度没有量化研究。

典范对应分析 (Canonical correspondence analysis, CCA), 是基于对应分析发展而来的一种排序方法, 它将对对应分析与多元回归分析相结合, 每一步计算均与环境因子进行回归, 又称多元直接梯度分析。在生态学研究中, 作为直接梯度分析的 CCA 分析因其能同时结合多个环境因子、包含大量的信息、结果准确等优点得到广泛应用^[10–16], CCA 排序图可以直观地看出各群落类型间的关系和影响群落分布格局的主要因素, 综合反映群落分布与环境因子之间的关系^[17]。本文以北京地区分

布的黄檗为研究对象, 采用 CCA 方法对黄檗样地的主要乔木树种分布与环境之间的关系进行分析, 以期找到影响黄檗分布的主要环境因子, 为黄檗种群的有效保护提供理论依据。

1 研究地区自然概况

北京市位于华北平原北端, 北以燕山山地与内蒙古高原接壤, 西以太行山与山西高原毗连, 东西宽 160 km, 南北长 170 km, 东南距渤海约 150 km。地理坐标为北纬 39°28′ ~ 41°05′、东经 115°25′ ~ 117°30′。全市总面积 16427.2 km², 其西部和北部为山地, 西部山地属太行山山脉, 北部山地属燕山山脉, 约占市域总面积的 62%, 最高峰为东灵山, 海拔 2303 m。东南部为平原, 呈西北高东南低的地形, 平均海拔约为 50 m。

北京属暖温带半湿润季风大陆性气候区, 四季分明, 年均气温为 11.8℃, 年均降水量约为 600 mm, 尤以北部山区等地最为突出。太阳辐射量全年平均为 110 ~ 130 kCal/cm², 年均日照时数 2000 ~ 2800 h^[18]。

北京地带性植被为暖温带落叶阔叶林和温带针叶林, 主要是以栎属 (*Quercus*)、桦木属 (*Betula*)、杨属 (*Populus*) 等落叶阔叶乔木树种占优势的落叶阔叶林和以油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) 占优势的温性针叶林^[18]。

北京地带性土壤为褐土, 约占全市面积的 64.7%。山区主要为棕壤、淋溶褐土和褐土, 土壤质地以砂壤、轻壤和中壤为主; 平原主要是潮土、褐潮土、潮褐土和褐土, 土壤质地 53.4% 为轻壤^[18]。

研究样地分别设置在北京市东北部的雾灵山自

然保护区、西部的百花山自然保护区和西北部的松山自然保护区(图 1)，这些自然保护区也是北京地区野生黄檗种群分布相对较多的区域。

2 研究方法

2.1 样地设置与数据收集

于 2013 年 8 – 9 月、2014 年 7 – 8 月，在北京市设置黄檗样地 12 块，其中百花山自然保护区 2 块，松山自然保护区 3 块，雾灵山自然保护区 7 块。样地面积为 20 m × 20 m，并将其划分为 16 个 5 m × 5 m 的样格，记录样格内所有胸径 (DBH) > 4 cm 的乔木物种的名称、胸径、株数等指标，并记录样地所处的海拔 (ALT)、坡度 (SLO)、坡向 (ASP) 和群落郁闭度 (CD)；同时，在样地内随机采集地面以下 20 cm 深的土样 3 份，带回北京林业大学土壤实验室进行养分测试分析。

2.2 数据处理

2.2.1 物种数据处理

乔木层是森林生态系统的主要组成部分，其组成决定了林下灌木和草本的组成和结构^[16]。本研究只选取乔木物种数据进行分析。根据 12 个黄檗样地的乔木树种数据，统计各个乔木树种的多度

数据，选取多度>10 的乔木树种建立物种矩阵，作为 CCA 分析中的物种矩阵。

2.2.2 环境数据处理

为建立环境数据矩阵，坡向数据以等级制表示：将坡向按照 45°夹角，以正北方向为 0°，顺时针方向旋转分为 8 个坡向等级，1 表示北坡 (0 ~ 22.5°、337.5° ~ 360°)，2 表示东北坡 (22.5° ~ 67.5°)，3 表示西北坡 (292.5° ~ 337.5°)，4 表示东坡 (67.5° ~ 112.5°)，5 表示西坡 (247.5° ~ 292.5°)，6 表示东南坡 (112.5° ~ 157.5°)，7 表示西南坡 (202.5° ~ 247.5°)，8 表示南坡 (157.5° ~ 202.5°)，数字越大，表示坡向越向阳^[14]。

2.2.3 土壤数据处理

在北京林业大学土壤实验室内对土壤的 pH 值、碱解氮 (AN)、速效磷 (AP)、速效钾 (AK)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、有机质 (OM) 进行检测。其中，土壤 pH 值用电位法测定，土壤碱解氮采样碱解扩散法进行检测，速效磷采用 Olsen 法进行测定，速效钾用中性 1 mol/L 的 NH₄Ac 溶液提取结合火焰光度法测定，土壤全氮含量测定采用凯氏定氮法，土壤全磷含量的测定采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮-钼锑抗比色法，土壤有机质含量测定采用 K₂Cr₂O₇ 容量法。对每个样地内 3 个重复土样，取

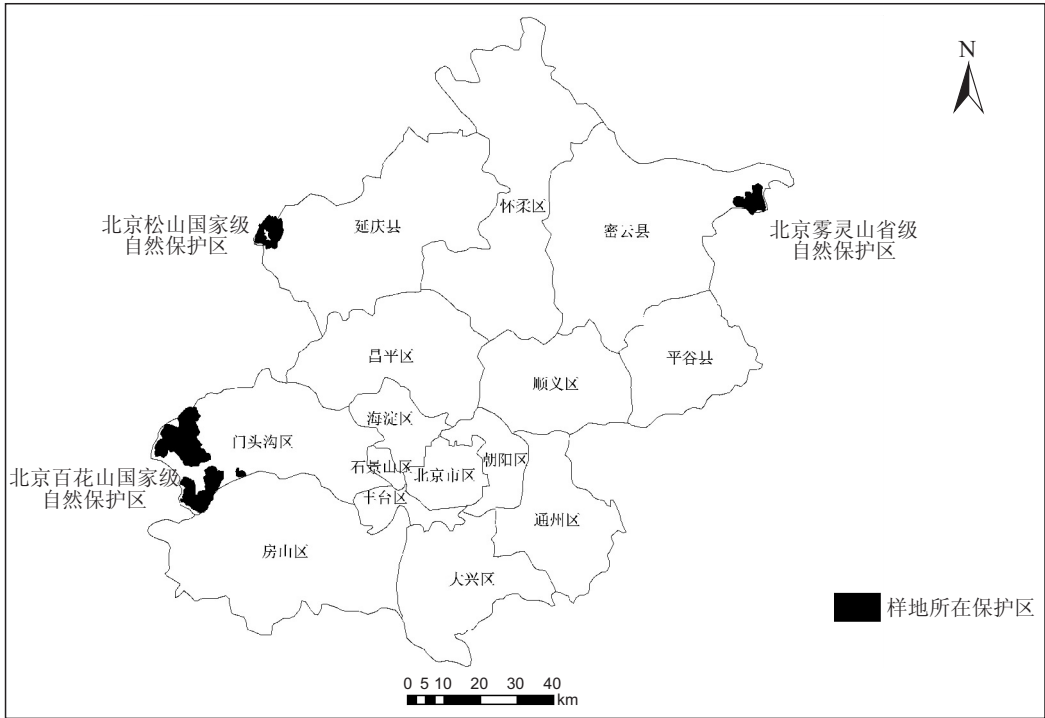


图 1 样地所在自然保护区位置图
Fig. 1 Distribution of the reserves where sample plots were located

各指标的平均值作为样地内该土壤的指标值，共计 12 组土壤数据。

2.3 分析方法

2.3.1 环境因子的相关性分析

对海拔 (ALT)、坡度 (SLO)、坡向 (ASP)、郁闭度 (CD)、pH 值、碱解氮 (AN)、速效磷 (AP)、速效钾 (AK)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、有机质 (OM) 11 个环境因子进行相关性分析，剔除部分具有显著相关的环境因子，以防止在进一步的分析中干扰分析结果。

2.3.2 CCA 排序分析

应用 R 语言中的 Vegan 包，以物种多度值和环境因子建立物种-环境矩阵，采用 CCA 分析样地群落分布与环境的关系^[19]，采用蒙特卡罗置换检验，分析环境因子对物种分布的解释量，并将环境因子分类为土壤数据和非土壤因子，分别计算两类环境因子对物种分布的解释量。

2.3.3 环境变量对物种分布格局影响的定量分离分析

环境变量对物种分布格局影响的定量分离分以下 4 步：土壤因子约束下物种的典范对应分析；非土壤因子约束下物种的典范对应分析；剔除非土壤因子后环境约束下物种的典范对应分析；剔除土壤因子后地形约束下物种的典范对应分析^[13]。

3 结果与分析

3.1 主要乔木物种组成及环境因子间的相关性

在调查的 12 块样地中，选择多度>10 的 10 个

乔木树种进行分析(表 1)。黄檗样地环境数据见表 2。

利用 Pearson 相关系数计算土壤因子之间、土壤因子与地形之间的相关性，结果可见(表 3)，多个环境因子之间均存在显著相关性，其中，海拔与碱解氮呈极显著正相关($P < 0.01$)，与 pH 呈显著正相关($P < 0.05$)，与土壤有机质、速效磷、全氮、全磷呈极显著负相关($P < 0.01$)；郁闭度与速效磷、速效钾呈极显著负相关($P < 0.01$)；土壤 pH 值与碱解氮呈显著正相关($P < 0.05$)，与土壤有机质、速效磷、全氮、全磷、速效钾呈极显著负相关($P < 0.01$)；碱解氮与土壤有机质、速效磷、全氮、全磷呈极显著负相关($P < 0.01$)；土壤有机质与速效磷、全氮、全磷呈极显著正相关($P < 0.01$)。

表 1 黄檗样地主要乔木物种
Table 1 Main tree species in *Phellodendron amurense* plots

序号 No.	物种 Species	多度 Abundance
1	黄檗 <i>Phellodendron amurense</i> Rupr.	227
2	紫椴 <i>Tilia amurensis</i> Rupr.	96
3	五角枫 <i>Acer mono</i> Maxim.	45
4	核桃楸 <i>Juglans mandshurica</i> Maxim.	42
5	山杏 <i>Prunus armeniaca</i> var. <i>ansu</i> Maxim.	34
6	暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i> (Blume) Hara var. <i>amurensis</i>	29
7	槲树 <i>Quercus dentate</i> Thunb.	16
8	大叶白蜡 <i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance.	21
9	北京丁香 <i>Syringa pekinensis</i> Rupr.	12
10	加杨 <i>Populus × canadensis</i> Moench	11

表 2 黄檗样地环境数据
Table 2 Environmental data sheet of *Phellodendron amurense* plots

样地号 No. of plot	海拔 ALT (m)	坡向 ASP	坡度 SOL	郁闭度 CD	土壤 pH	碱解氮 AN (mg/kg)	土壤有机质 OM (%)	速效磷 AP (mg/kg)	全氮 TN (%)	全磷 TP (%)	速效钾 AK (mg/kg)
p21	1263	北偏西 60°	30	0.8	6.41	346.08	8.63	12.14	0.43	0.08	278.72
p22	1110	北	1	0.9	6.93	188.54	5.05	7.56	0.24	0.08	118.87
p23	1180	东	5	0.9	6.26	322.96	7.90	10.17	0.40	0.10	251.54
p24	959	东偏南 10°	3	0.85	6.82	186.76	4.71	4.73	0.18	0.07	102.88
p25	1512	东	30	0.5	6.62	425.87	13.23	20.35	0.59	0.11	334.41
p26	964	东北	25	0.8	5.75	18.71	68.86	19.66	3.50	0.40	347.33
p27	290	北偏西 30°	20	0.7	5.87	44.38	55.90	29.87	3.45	0.38	324.67
p28	332	北偏西 30°	20	0.7	6.02	38.46	53.56	27.22	2.93	0.35	302.00
p29	281	北偏西 30°	15	0.7	6.13	22.79	47.89	25.62	2.41	0.38	384.00
P30	342	北	15	0.4	5.93	49.23	45.63	30.61	2.68	0.31	465.33
P31	342	北	15	0.4	6.04	39.23	41.16	26.45	2.19	0.46	412.67
P32	348	西南	10	0.6	5.73	36.27	40.88	26.01	2.51	0.43	400.67

Notes: ALT, Altitude; CD, Crown density; SOL, Slope; ASP, Slope aspect; AN, Alkali-hydrolyzable nitrogen; pH, Soil pH; OM, Soil organic matter; AP, Available phosphorus; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus; AK, Available potassium. Same below.

根据环境因子之间的相关性分析，考虑到土壤因子中土壤有机质、速效磷、全氮、全磷、速效钾之间均呈极显著正相关，取其一进行分析即可，我们选取土壤有机质(OM)进一步进行 CCA 排序分析。最终共选择了 7 个环境变量作为 CCA 分析中的环境矩阵，分别是海拔、郁闭度、坡度、坡向、碱解氮、土壤 pH 值和土壤有机质。

3.2 黄檗样地的 CCA 排序

从 CCA 排序结果可以看出(图 2)，各样地和乔木物种在 CCA 排序图中能较好地地区分开来并有一定的分布规律。第一轴主要反映海拔、郁闭度和坡度的变化，其中海拔与黄檗的生长分布具有较高

的相关性；第二轴主要反映有机质含量、碱解氮含量、pH 值和坡向的变化，其中有机质含量、碱解氮含量和 pH 值与黄檗的生长分布具有较高的相关性，前两轴的累计贡献率为 57.28%。整体来看，各物种和样地在 CCA 排序轴上的分布格局与环境梯度较吻合，黄檗分布于排序图中心靠右；海拔范围为 300 ~ 1500 m，低海拔更适宜其生长分布；阴坡、阳坡均有分布，阴坡分布状况更加良好；1°~ 30°坡度均有分布，且坡度越小越适合黄檗生长；分布样地郁闭度为 0.4 ~ 0.9，且郁闭度低的环境黄檗生长状况较好；黄檗在土壤 pH 值小、碱解氮含量低、土壤有机质高的样地生长状况较好。

表 3 环境因子之间的皮尔森相关性分析
Table 3 Pearson correlation analysis of environmental factors

环境因子 Environmental factors	海拔 ALT	坡向 ASP	坡度 SOL	郁闭度 CD	土壤 pH 值 pH	碱解氮 AN	土壤有机质 OM	速效磷 AP	全氮 TN	全磷 TP	速效钾 AK
ALT	1	0.096	0.142	0.434	0.667 *	0.887 **	-0.715 **	-0.760 **	-0.761 **	-0.831 **	-0.545
ASP		1	-0.168	0.208	0.033	0.193	-0.246	-0.211	-0.207	-0.15	-0.201
SOL			1	-0.337	-0.308	0.163	0.342	0.4	0.31	0.183	0.469
CD				1	0.403	0.252	-0.368	-0.744 **	-0.393	-0.52	-0.791 **
pH					1	0.669 *	-0.864 **	-0.789 **	-0.887 **	-0.867 **	-0.800 **
AN						1	-0.825 **	-0.619 *	-0.833 **	-0.859 **	-0.428
OM							1	0.810 **	0.989 **	0.911 **	0.675 *
AP								1	0.845 **	0.842 **	0.874 **
TN									1	0.916 **	0.684 *
TP										1	0.748 **
AK											1

注：*，表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；**，表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。
Notes: *, Significant correlation at the 0.05 level (both sides); **, Significant correlation at the 0.01 level (both sides). Same below.

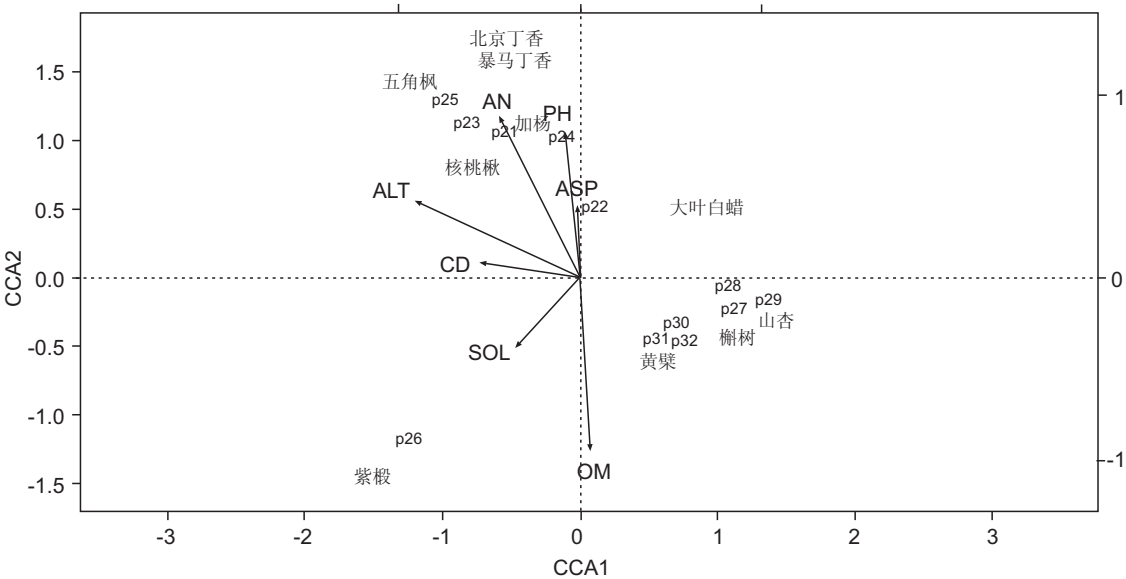


图 2 黄檗样地 CCA 排序图
Fig. 2 CCA ordination diagrams of *Phellodendron amurense* plots

从检验结果可以看出(表 4)，海拔、碱解氮和土壤有机质对黄檗分布的影响达显著水平($P < 0.01$)。

表 4 环境因子对黄檗分布影响的显著性检验
Table 4 Significant effects of environmental factors on the distribution of *Phellodendron amurense*

环境因子 Environmental factors	CCA1	CCA2	r^2	P
海拔 ALT	-0.912	0.409	0.951	0.001***
坡向 ASP	-0.0139	0.999	0.161	0.604
坡度 SOL	-0.672	-0.740	0.265	0.527
郁闭度 CD	-0.672	-0.740	0.265	0.527
土壤 pH 值 pH	-0.991	0.137	0.285	0.475
碱解氮 AN	-0.413	0.911	0.950	0.002**
土壤有机质 OM	0.026	-0.999	0.911	0.001***

注：CCA1，表示第一排序轴的相关性系数；CCA2，表示第二排序轴的相关性系数； r^2 ，表示复相关指数； P ，表示 P 值。
Notes: CCA1, Correlation coefficient of the first axis; CCA2, Correlation coefficient of the second axis; r^2 , Complex correlation index; P , P value.

3.3 环境变量对黄檗样地物种分布格局影响的定量分离

环境变量对黄檗样地物种分布格局影响的定量分离结果表明，在 7 个环境变量因子的约束下，物种典范特征值为 2.663，其中，纯土壤因子对物种分布的解释能力为 30.99%，非土壤因子对物种分布的解释能力为 37.27%，土壤因子和非土壤因子共同对物种分布的解释能力为 84.50%；土壤因子和非土壤因子交互作用对物种分布的解释能力为 16.24%，未能解释的部分为 15.50%。该结果可由维恩图清楚地表示出来(图 3)。

检验环境因子与物种分布相关的显著性可以通过蒙特卡罗置换检验(999 次)进行分析^[17]，分析 7 个环境因子对物种分布的解释量是否具有显著性，检验结果显示 P 值为 0.003，说明排序的结果可以接受环境因子对物种分布的解释量。

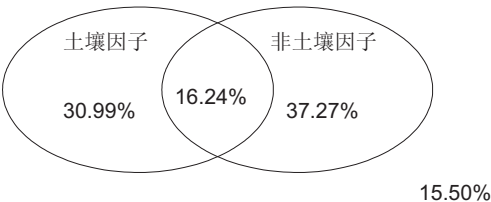


图 3 环境变量定量分离维恩图解

Fig. 3 Quantitative separation of environmental variables

4 讨论

海拔、碱解氮和土壤有机质是影响黄檗生长与分布的主要环境因素。张阳^[9]在对黄檗活性成分与气象因子关系的研究中发现热量因子对黄檗活性成分的影响程度最强，年活动积温越高越有利于黄檗中各活性成分的积累。本研究中海拔的变化实质上反映了黄檗生长地区的热量条件，即间接热量因子，低海拔下黄檗的生长状况最优，这与张阳的研究结果一致。土壤有机质含量是衡量土壤肥力的一项重要指标^[20,21]，有机质除了提供植物生长所需要的各种营养元素外，还能通过影响土壤物理、化学和生物学性质来提高土壤肥力，从而影响作物的生长状况^[20]，一般来讲有机质含量越高，越能促进植物的生长，这在植物生长与有机质含量关系的研究中已得到验证。本研究发现土壤有机质含量对黄檗生长和分布也有显著影响。土壤碱解氮的高低能反映土壤氮素的供应状况，本研究发现土壤碱解氮越低，越利于黄檗的生长分布，但也有研究认为施氮量越高越有利于黄檗体内可溶性蛋白的积累^[22]，有利于黄檗生长，这可能是因为碱解氮包括无机的矿物氮和部分有机质中易分解的、比较简单的有机态氮，是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮的总和，从而导致不同的结果。李霞等^[23]研究认为，土壤中铵态氮和硝态氮的比值越小越有利于黄檗幼苗的生长。因此土壤碱解氮的形态对黄檗生长与分布的影响还需要进一步深入探究。另外，在郁闭度低的环境条件下，黄檗的生长和分布较好，说明黄檗对光照的要求较高；从坡向来看，虽然阴坡、阳坡均分布有黄檗，但是阴坡的分布状况好于阳坡，这是由于坡向不仅影响光照同时也影响水分和温度，此结果说明虽然黄檗为阳性树种，但在水分等其他条件较好的情况下阴坡也能较好生长。本研究发现，黄檗在 1° ~ 30° 坡度范围内均有分布，但缓坡的分布状况更好，这是因为坡度的陡缓对土壤水分的储蓄影响较大，土壤水分越充足黄檗的分布状况越好，说明黄檗的生长分布状况与土壤水分储蓄有关。根据以上结果可以推测，水分等条件对黄檗分布的影响可能大于光照对黄檗的影响，这与李静贤^[1]对北京山区野生黄檗数量特征的研究结果一致。

本研究中所有环境因子对物种分布的解释能力

为 84.5%，说明所选环境因子是影响物种分布的重要因子，由于研究区域位于自然保护区，受人为干扰较少，植物群落分布和环境保持着良好的对应关系，这与辛晓平等^[24]对松嫩平原碱化草地群落物种多度分布与环境、空间关系的研究结果一致，即在人为干扰较轻的区域，植物群落分布与环境保持着良好的对应关系，环境因子对物种分布的解释能力较高。在所有环境因子中，土壤因子对物种分布的解释能力为 30.99%，海拔、坡向等非土壤因子对物种分布的解释能力为 37.27%，两者对物种分布的解释能力相近，说明土壤因子与非土壤因子都是影响黄檗分布的重要因子，土壤因子与非土壤因子的共同解释部分为 16.24%，表明了地形因子与土壤因子间的耦合特征。而不能解释的部分主要包含由生物间相互作用及随机因素引起的变化，即物种之间的相互作用，如竞争排除引起的异域分布、互惠关系引起的种间联结对物种分布格局可能有一定影响^[16]。

5 结论

通过 CCA 排序可以看出，12 个黄檗样地的物种分布与环境因子间存在较明显的关系。海拔、碱解氮和土壤有机质在 CCA 排序中表现出与黄檗的生长分布具有显著的相关性，因此可以认为海拔、碱解氮和土壤有机质是影响黄檗生长与分布的主要环境因素。

本研究中黄檗分布海拔的跨度较大，从海拔 281 ~ 1263 m 均有分布，但低海拔下生长状况更好；黄檗样地土壤碱解氮的含量差别很大，而适宜黄檗分布的样地土壤碱解氮含量大多在 20 ~ 50 mg/kg 之间，说明土壤碱解氮含量越低，黄檗的生长越好；土壤有机质含量越高，黄檗生长越好、分布也越多。另外，其他环境因素对黄檗的生长分布也有影响，在郁闭度低的环境条件下黄檗生长分布较好；在 1° ~ 30° 的坡度范围内均有分布，但在缓坡分布更好，因为坡度的陡缓对土壤水分的储蓄影响较大，土壤水分越充足其分布状况越好，因此黄檗的生长分布状况与土壤水分储蓄有关；从坡向来看，阴坡、阳坡均有黄檗分布，但阴坡分布状况好于阳坡。

本研究中所有环境因子对物种分布的解释能力为 84.5%，显示出较好的排序效果，说明所选环

境因子是影响物种分布的重要因子。在所有环境因子中，土壤因子对物种分布的解释能力为 30.99%，海拔、坡向等非土壤因子对物种分布的解释能力为 37.27%。

参考文献:

- [1] 李静贤. 北京山区野生黄檗数量特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
Li JX. Study on quantitative characteristics of wild *Phellodendron amurense* in Beijing mountainous area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [2] 张玉红, 刘彤, 周志强. 黑龙江黄檗皮中药用活性成分含量差异及聚类分析[J]. 经济林研究, 2012, 30(3): 51-54.
Zhang YH, Liu T Zhou ZQ. Content differences and cluster analysis of bioactive constituents in *Phellodendron amurense* bark from Heilongjiang [J]. *Nonwood Forest Research*, 2012, 30(3): 51-54.
- [3] 秦彦杰. 黄檗主要药用成分的分布规律研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
Qin YJ. Study on the distribution of principal medicinal compositions in Amur cork tree [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [4] 祖元刚, 王延兵, 王慧梅, 孙莲慧. 黄檗 (*Phellodendron amuranse*) 叶片总 RNA 提取方法研究[J]. 植物研究, 2007, 27(5): 593-595.
Zu YG, Wang YB, Wang HM, Sun LH. The method for RNA isolating from leaves of *Phellodendron amuranse* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(5): 593-595.
- [5] 高杨, 刘铭, 张洪文. 珍稀植物黄檗的药用价值及可持续利用[J]. 中国保健营养, 2012(4): 22-24.
Gao Y, Liu M, Zhang HW. The medical value and sustainable utilization of rare medicinal materials Rrpr [J]. *China Health Care & Nutrition*, 2012(4): 22-24.
- [6] Lis A, Boczek E, Góra J. Chemical composition of the essential oils from fruits, leaves and flowers of the Amur cork tree (*Phellodendron amurense* Rupr.) [J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2004, 19(6): 549-553.
- [7] 刘琰璐, 戴灵超, 张昭. 黄檗繁殖技术研究进展[J]. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2011, 20(2): 84-87.
Liu YL, Dai LC, Zang Z. Research review on propagation techniques of *Phellodendron amurense* Rupr. [J]. *Journal of Minzu University of China: Natural Sciences Edition*, 2011, 20(2): 84-87.
- [8] 刘军. 黄檗药用林栽培技术研究[J]. 吉林林业科技, 2007, 36(1): 45-47.
Liu J. Study on cultural technique for drug plantation of *Phellodendron amurense* [J]. *Jilin Forestry Science And Technology*, 2007, 36(1): 45-47.
- [9] 张阳. 野生黄檗中活性成分与生态因子相关性研究[D]. 北

- 京: 北京协和医学院, 2015.
- Zhang Y. Correlative study between active components of wild *Phellodendron amurense* Rupr. and ecological factors [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2015.
- [10] Braak CJFT. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167–1179.
- [11] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. London: Cambridge University Press, 2003, 22(2006): 193–193.
- [12] 张海燕, 刘彬. 博斯腾湖湖滨湿地植被数量分类与排序[J]. *植物科学学报*, 2015, 33(1): 36–43.
- Zhang HY, Liu L. Quantitative classification and ordination of plant vegetation in the Bosten Lake wetlands[J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(1): 36–43.
- [13] 王自业, 葛继稳, 李建峰, 程腊梅, 吴述园, 冉桂花, 苗文杰. 三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系[J]. *植物科学学报*, 2013, 31(3): 219–227.
- Wang ZY, Ge JW, Li JF, Cheng LM, Wu SY, Ran GH, Miao WJ. Relationship between periphyton distribution and water quality of gufu river of Three Gorges Reservoir area [J]. *Plant Science Journal*, 2013, 31(3): 219–227.
- [14] 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.
- Qiu Y, Zhang JT. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 199–206.
- [15] 宋闪闪, 姜炎彬, 张庆忠, 李融, 邵小明. 黑龙江兴凯湖沼泽地苔藓植物群落初步研究[J]. *植物科学学报*, 2011, 29(3): 272–277.
- Song SS, Jiang YB, Zhang QZ, Li R, Shao XM. Preliminary research on bryophyte communities in Xingkai Lake marshland, Heilongjiang Province, China[J]. *Plant Science Journal*, 2011, 29(3): 272–277.
- [16] 邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 王贺年. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6092–6099.
- Shao FL, Yu XX, Zheng JK, Wang HN. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6092–6099.
- [17] 赖江山, 米湘成. 基于 Vegan 软件包的生态学数据排序分析 [C]//马克平主编. 第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集(厦门, 2010). 北京: 气象出版社, 2012.
- Lai JS, Mi XC. Ordination analysis of ecological data using vegan package in R [C]// Ma KP ed. Advances in biodiversity conservation and research in china IX: proceedings of the ninth national conference on the conservation and sustainable use of biodiversity in China (Xiamen, 2010). Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [18] 余琦殷, 邢韶华. 北京市三种重点保护植物(紫椴、黄檗、胡桃楸)的种群生态学研究[D]. 北京林业大学, 2015.
- Yu QY, Xing SH. Studies on the population ecology of three key protected species (*Tilia amurensis*, *Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*) in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [19] 赖江山. 数量生态学——R 语言的应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 184–185.
- Lai JS. Numerical Ecology with R [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014: 184–185.
- [20] 葛顺峰, 姜远茂, 陈倩, 周恩达, 王富林, 房祥吉. 土壤有机质含量对平邑甜茶生长及氮素吸收和损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 81–84.
- Ge SF, Jiang YM, Chen Q, Zhou ED, Wang FL, Fang XJ. Effect of soil organic matter content on growth and ¹⁵N-urea absorption, utilization and loss of *Malus hupehensis* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 81–84.
- [21] 马麟英. 不同立地类型土壤有机质含量对板栗初生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(30): 13273–13275.
- Ma LY. Effect of soil organic matter content at different site types on early growth of *Castanea mollissima* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(30): 13273–13275.
- [22] 赵一楠, 杨玉焕. 施氮量对黄檗幼苗氮代谢相关酶类的影响[J]. *吉林师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(4): 43–45.
- Zhao YN, Yang YH. Effects of nitrogen fertilizer rate on nitrogen metabolism-related enzymes of corktree seedlings [J]. *Journal of Jilin Normal University: Natural Sciences Edition*, 2010, 31(4): 43–45.
- [23] 李霞. 环境因子对黄檗幼苗生长及主要药用成分含量的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006: 61–70.
- Li X. Effect of environmental factors on the growth and principal medicinal compositions of amur corktree seedlings [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006: 61–70.
- [24] 辛晓平, 高琼, 李镇清, 杨正宇. 松嫩平原碱化草地植物群落分布的空间和环境因素分析[J]. *植物学报*, 1999, 41(7): 775–781.
- Xin XP, Gao Q, Li ZQ, Yang ZY. Partitioning the spatial and environmental variations of plant community structure of alkaline grassland on Songnen Plain [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(7): 775–781.