

文章编号: 1008-2786-(2007)4-469-06

## 贺兰山针叶林物种密度的通径分析

朱源<sup>1</sup>, 康慕谊<sup>1</sup>, 刘全儒<sup>2</sup>, 江源<sup>1\*</sup>, 苏云<sup>3</sup>, 赵登海<sup>3</sup>, 和克俭<sup>1</sup>, 陶岩<sup>1</sup>, 朱恒峰<sup>1</sup>, 徐广才<sup>1</sup>, 王耿锐<sup>1</sup>

(1 北京师范大学资源学院, 中国生态资产评估研究中心, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2 北京师范大学生命科学院, 北京 100875;

3 内蒙古自治区贺兰山国家级自然保护区管理局, 内蒙古 阿拉善左旗 750306)

**摘要:** 通径分析是研究变量间复杂关系的一种有效方法。在沿海拔梯度进行群落调查的基础上, 对贺兰山针叶林物种密度进行通径分析, 结果表明: 1) 贺兰山东西坡针叶林物种密度的海拔格局基本一致。物种密度的主要影响因素是海拔, 而海拔反映了综合的气候梯度。2) 针叶林的物种密度明显随着海拔的升高而降低, 表层土壤有机质含量的增高对于物种密度有促进作用。3) 针叶林的物种密度主要由草本种类的多少决定。草本和灌木层物种密度都明显受到海拔和土壤有机质含量的影响。坡向对于灌木层物种密度也有一定影响。

**关键词:** 物种密度; 通径分析; 海拔; 土壤性质; 贺兰山

**中图分类号:** Q948

**文献标识码:** A

山地物种多样性的研究至今仍是研究的热点, 但对其成因机制, 各种假说、解释和理论众多<sup>[1-8]</sup>。生境条件对物种多样性起着重要的作用<sup>[9,10]</sup>, 而山地垂直高差形成的海拔梯度与纬度梯度相似, 都是水热梯度, 山地复杂的生境条件显著影响着物种多样性。一般来说, 山地物种多样性存在随海拔递减与中海拔最丰富两种格局, 不同的研究给出的解释不尽相同<sup>[4-8]</sup>。然而, 面对众多纷繁复杂、相互关联的环境因子, 直接研究物种多样性的影响因素, 却并不容易。以往大多是通过定性或间接的方法来描述环境因子之间的相互关系, 如多元回归分析<sup>[11,12]</sup>、排序方法<sup>[13]</sup>等, 之后再将其与生物多样性相联系, 分析过程略显含糊。或者是仅调查少数几个被认为是重要的影响因子, 分析其与生物多样性的关系, 但这往往是基于研究者丰富且准确的经验, 而且重要的因子很可能会遗漏。面对大量的环境因子和生物多样性指标, 分析环境因子之间的相互关联, 研究其

与生物多样性之间的关系, 通径分析是一有力的工具。通径分析 (Path Analysis) 是研究变量之间因果关系的一种方法, 被认为是相关分析的继续<sup>[14]</sup>。通过将简单的相关系数分解为多个部分, 通径分析可以得出某一变量对因变量的直接作用效应与间接作用效应。通径分析常用于社会科学领域<sup>[14]</sup>, 特别是心理学研究, 在国外的海岸湿地物种密度与环境因子关系的研究中, 也得出了很好的结果<sup>[15]</sup>。通径分析需要事先构建模型, 也就是要预先设定变量之间的关系 (即谁对谁起作用)。模型中的变量, 特别是因变量需要保证统计独立性, 即模型中尽可能不要同时选择存在明显相关的几个被解释变量, 选择一个即可。输入数据进行分析后, 如果模型能够通过检验, 则表明预先建立的关系是可信的, 否则需要进行调整。将通径分析运用到生物多样性的研究中, 将有助于解释环境因子之间、以及与生物多样性之间的相互关系。

收稿日期 (Received date): 2006-12-11; 改回日期 (Accepted): 2007-04-05.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40371043, 40671065, 40571001)。[National Natural Science Foundation of China (No. 40371043, 40671065, 40571001).]

作者简介 (Biography): 朱源 (1983-), 男, 江西武宁人, 博士研究生, 主要从事植被及生物多样性研究。[Zhu Yuan, born in Wuning County, Jiangxi Province in 1983, male, doctorate candidate, mainly engage in the research of vegetation ecology and biodiversity. E-mail: zhuyuan@ires.cn]

\* \* 通讯联系人: E-mail: Jiang@bnu.edu.cn (Tel): 010-58806093

## 1 研究区概况和数据获取

贺兰山位于我国温带草原与荒漠两大植被区域的过渡带,其岭脊也是宁夏回族自治区和内蒙古自治区的区界<sup>[16,17]</sup>。贺兰山山体大致为北东走向,最宽处在中段,主峰俄博疙瘩海拔 3 556 m。贺兰山东、西坡分属不同的自然区域,山体基带分别为荒漠草原带和草原化荒漠带,西坡基带较之东坡更早。大约在海拔 1 700 m 以上,东、西坡的植被和土壤分布基本相同,分别为山地灰钙土疏林灌丛带、山地灰褐土针叶林带和高山草甸土灌丛草甸带<sup>[18,19]</sup>。贺兰山东(宁夏境内)、西(内蒙古境内)两侧分别建立了自然保护区的近几年以来,封山育林,森林植被得到了较好的恢复<sup>[20]</sup>。

贺兰山的森林绝大部分为针叶林,其中青海云杉(*Picea crassifolia*)林的面积最大,其次为油松(*Pinus tabulaeformis*)林,两者绝大部分都是纯林。青海云杉林在贺兰山东西两侧都为大面积分布,油松林则仅出现在东坡,西坡只有少量的油松混交林<sup>[21-23]</sup>。本研究选择了贺兰山中段东坡的苏峪沟和西坡的哈拉乌北沟进行野外调查,苏峪沟的调查范围是海拔 2 000~2 900 m,其中 2 000~2 350 m 为油松林,之上则为青海云杉林,哈拉乌北沟的调查范围是海拔 2 350~3 100 m,全部为青海云杉林。

研究区的森林绝大部分为纯林<sup>[24]</sup>,林下植被稀疏且种类简单,仅在东坡的油松林向青海云杉林过渡区域出现少量混交林。调查到的乔木种类仅六种,常见的有油松、青海云杉、杜松(*Juniperus rigida*)和山杨(*Populus davidiana*)。因此运用 10 m × 10 m 的样方进行物种调查<sup>[25,26]</sup>,同时估测林冠郁闭度(%)。10 m × 10 m 的样方沿海拔梯度布设,每 100 m 布设两个。样方布设在典型的针叶林内,避开林缘。苏峪沟和哈拉乌北沟分别调查得到了样方 19 个。样方的位置和地形因子包括经纬度、海拔(m)、坡度(°)和坡向,通过手持 GPS 罗盘和地形图测量。坡向以正北为 0°,逆时针旋转直至 360°,通过  $1 + \cos(\text{坡向度})$  的转换,成为 [0,2] 之间的数,数值越大,表明坡向越朝北。样方的土层深度(m)用土钻在样方内随机测 5 个点求平均得到。土壤的有机质含量(%)、全氮含量(%)和 pH 值是取根系层土壤经实验室分析后得到。有机质的测定采取重铬酸钾氧化-外加热法, pH 值的测定采取电位法(水浸

提),全氮含量的测定采取半微量凯氏法。

## 2 数据分析

通径分析中,某变量对因变量的影响可分为两个部分,一为直接效应(Direct Effect),另一为通过其他变量产生的效应,即间接效应(Indirect Effect),直接效应和间接效应之和为总效应(Total Effect),而直接效应也称为通径系数(Path Coefficient)。本文以物种密度为研究对象。物种密度(种/100 m<sup>2</sup>)就是每个样方内的物种数,包括乔木、灌木和草本。通径分析的假设为:(1)地形因子(即海拔、坡向和坡度)影响表层土壤特征、林冠郁闭度和物种密度,其本身不受其他因子的影响;(2)表层土壤的理化性质(有机质含量、全氮含量和 pH 值)受地形因子的影响,能够影响植被状况,包括林冠郁闭度和物种密度;(3)土层深度反映了长期以来的成土过程,能够影响表层土壤的理化性质和植被生长状况;(4)针叶林的遮光对于林下物种影响较大,因此林冠郁闭度对于物种密度有影响。相关分析表明,土壤有机质含量和全氮含量的相关系数为 0.775 ( $p < 0.001$ ),因此仅选择其中一个因子。通径分析模型的构建和运算在 SPSS-AMOS 5.0 软件中完成,通径分析模型图见图 1。通径分析需要进行显著性检验,本文用 *GFI*(Goodness of fit index)指数来表征拟合的优度。*GFI* 是 [0,1] 之间的数,当 *GFI* = 1 时,表明是完美的拟合,而当 *GFI* = 0 时,表明拟合完全失败,即 *GFI* 越大表明拟合的优度越好<sup>[15]</sup>。

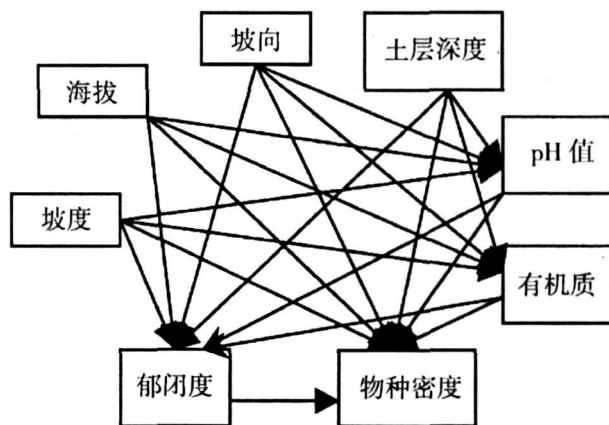


图 1 设计的通径分析模型

Fig 1 General model of path analysis

### 3 研究结果

#### 3.1 研究区物种多样性概况

共调查到植物 123 种, 其中乔木 6 种, 灌木 17 种, 草本 100 种。从图 2 可知, 贺兰山针叶林物种密度沿海拔的分布, 东坡和西坡大体上一致。海拔 2 000~ 2 500 m, 物种密度随海拔有波动, 但相对比较平稳, 一般为 10~ 25 种 /100 m<sup>2</sup>, 这个海拔范围包括油松林、少量的混交林和中低部位的青海云杉林, 林冠的郁闭度不是很高, 林下植被覆盖中等, 灌木和草本种类较丰富。海拔 2 500~ 2 900 m, 物种密度迅速下降, 一般小于 10 种 /100 m<sup>2</sup>, 大约在 2 800 m 处达到最低值, 也是全山物种丰富度最小处<sup>[27]</sup>。这个海拔范围内都是青海云杉纯林, 有研究认为是青

海云杉林的顶级群落<sup>[16]</sup>, 气候冷湿, 林冠郁闭度极高, 林下物种很少, 有的样方林下甚至除了青海云杉幼苗外, 没有其他植物。海拔 2 900~ 3 200 m, 物种密度回升, 可达到 10 种 /100 m<sup>2</sup> 左右, 该海拔范围达到了高山林线的位置, 样区内的青海云杉株数开始减少直至消失, 林下侵入高山灌丛和草甸的物种。

#### 3.2 通径分析的结果

通径分析的结果显示, 物种密度的变差被解释了 47. 3%, 结果较好, 其中对于物种密度影响最大的因子是海拔 (图 3)。表层土壤有机质含量被解释了 43% 的变差, 林冠郁闭度被解释了 40% 的变差。模型检验表明 ( $\chi^2 = 27. 4$   $df = 7$   $p < 0. 001$ ;  $GFI = 0. 87$ ), 拟和的结果能够通过显著性检验,  $GFI$  指数接近 0. 9 拟合优度良好。

表 1 变量对于因变量的直接效应和总效应, 加粗的系数表示显著 ( $p < 0. 05$ )  
Table 1 Direct (DE) and Total (TE) effects on dependent variables in path model and the boldface characters indicating significant effects ( $p < 0. 05$ )

指标	海拔		坡度		坡向		土层深度		郁闭度		有机质		pH 值	
	Elevation		Slope		Aspect		Soil depth		Coverage		Organic matter		pH value	
	DE	TE	DE	TE	DE	TE	DE	TE	DE	TE	DE	TE	DE	TE
有机质	0. 57	0. 57	- 0. 24	- 0. 24	- 0. 25	- 0. 25	0. 11	0. 11	-	-	-	-	-	-
pH 值	- 0. 36	- 0. 36	- 0. 08	- 0. 08	0. 22	0. 22	0. 01	0. 01	-	-	-	-	-	-
郁闭度	- 0. 11	- 0. 03	- 0. 04	0. 07	- 0. 22	- 0. 29	0. 05	0. 02	-	-	- 0. 24	- 0. 24	- 0. 59	- 0. 59
物种密度	- 0. 67	- 0. 58	0. 07	- 0. 02	- 0. 08	- 0. 07	- 0. 16	- 0. 13	- 0. 13	- 0. 13	0. 28	0. 31	0. 18	0. 26

总体来看, 研究结果中的因子之间的直接效应较明显, 而间接效应一般较小 (表 1)。这是因为本文预定的通径模型主要是针对物种密度 (见图 1), 而其他因子都假定对于物种密度是有直接影响的, 所得结果必然是间接效应小。从表 1 中可知, 表层土壤有机质含量明显受到海拔、坡度和坡向的影响。海拔越高, 表层土壤有机质含量越高, 原因可能在于随着海拔的升高, 气候越为冷湿<sup>[28]</sup>, 表层土壤有机质的分解越慢, 而积累增加。坡度越陡、坡向越朝向阴坡, 表层土壤的有机质含量有降低的趋势。表层土壤的 pH 值明显受到海拔的负效应, 海拔越高, 林下的环境越阴暗冷湿, 枯枝落叶的分解程度较低, 土壤 pH 值相对较小 (中性), 而低海拔的开阔林冠下, 土壤 pH 值偏碱性 (可达到 8)。林冠郁闭度明显与表层土壤的 pH 值呈负相关关系, 林冠越郁闭, 林下的光照越少, 枯枝落叶的分解程度越低, pH 值越低。物种密度明显受到海拔的影响, 随着海拔的升高, 冷

湿的气候越来越不适合大部分物种的生存, 物种密度明显降低。表层土壤有机质含量对物种密度也有一定的正效应, 反映了土壤养分条件越好, 能够生存的物种越多。

#### 3.3 乔灌草层的物种密度

针叶林样方的物种组成中, 草本最多, 灌木其次, 而乔木一般只有 1 种, 仅少量样方存在 2~ 3 种乔木。样方草本层物种密度与物种密度 (即乔、灌、草物种之和) 的相关系数高达 0. 936 ( $p < 0. 001$ ), 且草本种类平均占到了样方所有物种的 70% 以上。也就是说, 物种密度的通径分析结果不仅能够用于解释针叶林的物种密度与环境因子的关系, 同时也充分反映了草本层物种密度与环境因子之间的关系。换句话说, 针叶林的物种密度基本上是由草本层物种密度决定的。

灌木层物种密度与物种密度的相关系数为 0. 683 ( $p < 0. 001$ ), 占到了样方物种平均的 20% 以

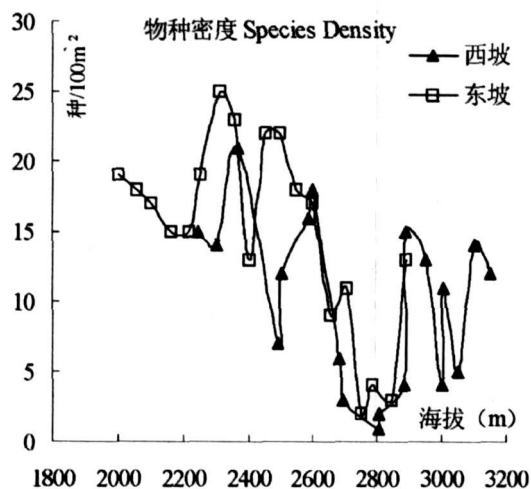
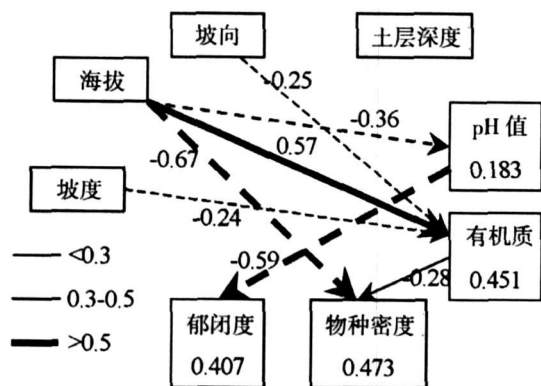


图 2 所有样方物种密度的海拔格局

Fig 2 Species density of all the plots along elevation



图中显示的为显著 ( $p < 0.05$ ) 的通路。实线表示正效应, 虚线表示负效应, 线宽表示通路系数的大小。因变量下面的数值表示被解释的方差。

图 3 通路分析的结果

Fig 3 Results of path analysis

上。如果将灌木层物种密度作为通路分析的因变量 (即在图 1 中, 将物种密度换成灌木层物种密度), 结果基本一致。对于灌木层物种密度来说, 被解释的方差达到了 0.71。灌木种类少是一个重要的原因。影响灌木层物种密度的变量主要有海拔、表层土壤有机质含量和坡向 ( $p < 0.05$ ), 通路系数分别为  $-0.921$ ,  $0.284$ ,  $-0.198$ 。与物种密度 (也是草本层物种密度) 的主要影响因素 (海拔和土壤有机质含量) 相比, 海拔对于灌木层物种密度的影响更为明显, 表层土壤有机质含量对于灌木和草本种类都有促进作用, 坡向对灌木层物种密度的影响明显。灌木种类受到坡向的影响可能反映了光照的作用, 阳坡较之阴坡光照强烈, 水分散失更多, 不利于灌木种类的生长。草本种类的层次在灌木层之下, 直接

受到光照的影响较小, 所以草本层物种密度与坡向的关系不明显 (见表 1)。

## 4 结论和讨论

### 4.1 海拔影响物种密度

从通路分析的结果来看, 海拔是贺兰山针叶林物种密度的最主要影响因子, 也是灌木和草本层物种密度的决定因子。实际上, 海拔反映的是综合的气候梯度<sup>[28]</sup>。对于年平均降水量来说, 一般随海拔升高而上升。对于气温来说, 随海拔上升而降低。正是水分和热量条件沿着海拔的变化, 使得针叶林的表层土壤理化特征和物种密度都随着海拔的变化存在明显的变化。除了反映气候条件的海拔直接影响物种密度外, 表层土壤的理化性质也能一定程度影响物种密度, 而表层土壤的理化性质同样明显地受到海拔的影响。

贺兰山针叶林物种密度基本上随着海拔升高而降低, 如果排除最下部和最上部的针叶林, 大致从海拔 2300~2900 m, 其物种密度与海拔的负相关关系更为明显, 相关系数为  $-0.645$  ( $p < 0.001$ ,  $N = 26$ )。在针叶林的最下部, 水热条件的配置比较优越, 加上多树种的混交, 灌木和草本种类丰富, 该海拔段成为了针叶林物种密度最丰富处, 但物种密度随着海拔的变化不大。在针叶林的最上部, 青海云杉林逐渐向高山灌丛和草甸过渡, 虽然气候更加冷湿, 但是林冠开阔, 林下光照条件较好, 生存了一些高山物种, 物种密度略有回升。针叶林的物种密度随海拔升高而显著降低的原因就在于, 随着海拔升高, 气候越来越冷湿, 林下环境越来越不适合物种的生存, 致使物种密度随之降低<sup>[4]</sup>。

### 4.2 通路分析

通过通路分析, 不仅能够得出两两变量之间的直接关系, 还能够通过构建因果关系模型, 了解变量之间的间接关系, 是研究多个环境因子与植被变量之间关系的有力工具。不过, 在构建通路分析的模式时, 合理的假设是必备的前提条件。有时候变量之间可能不是简单的线性关系, 那么对原始数据的“转化”也是必要的, 如取对数、平方根等<sup>[15]</sup>。因为通路分析本质上还是一种回归分析, 足够的数据量也是必备的前提条件, 如果分析的结果不够理想的话, 则很可能是遗漏了重要的变量。

在自然生态系统中, 生物与其所处的环境相互

关联、相互配合、相互制约、互为因果且协调发展。通径分析为分析这些因素之间的因果关系, 辨识其中主要的影响因素及其施加影响的过程, 提供了很好的思路与方法。同时, 成熟的软件也是该方法能够方便运用的保证条件, 除了本文使用的软件之外, LISREL 软件 (Scientific Software International Inc, Lincolnwood Illinois USA) 也是进行通径分析的常用软件。

致谢: 感谢宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局和内蒙古贺兰山国家级自然保护区管理局工作人员的大力协助。

## 参考文献 (References)

- [1] Whittaker R J, Willis K J, Field R. Scale and species richness towards a general hierarchical theory of species diversity [J]. *Journal of Biogeography*, 2001, 28: 453~470
- [2] Turner W R, Tyrvæ E. Scale-dependence in species-area relationships [J]. *Ecography*, 2005, 28: 721~730
- [3] Komer C. Why are there global gradients in species richness? Mountains might hold the answer [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15: 513~514
- [4] Lamolimo M V. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10: 3~13
- [5] Tang Zhiyao, Fang Jingyun. A Review on the elevational patterns of plant species diversity [J]. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 20~28 [唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 20~28]
- [6] Colwell R K, Lees D C. The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15: 70~76
- [7] Bachman S, Baker W J, Brummitt N, et al. Elevational gradients, area and tropical island diversity: an example from the palms of New Guinea [J]. *Ecography*, 2004, 27: 299~310
- [8] Sanchez-Gonzalez A, Lopez-Mata L. Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico [J]. *Diversity and Distributions*, 2005, 11: 567~575
- [9] O'Brien E M, Field R, Whittaker R J. Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation and topography [J]. *Oikos*, 2000, 89: 588~600
- [10] Moser D, Dullinger S, Englisch F, et al. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps [J]. *Journal of Biogeography*, 2005, 32: 1117~1127
- [11] Guisan A, Weiss S B, Weiss A D. GIM versus CCA: spatial modeling of plant species distribution [J]. *Plant Ecology*, 1999, 143: 107~122
- [12] Zhu Yuan, Kang Muyi. Application of ordination and GIM/GAM in the research of the relationship between plant species and environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 807~811 [朱源, 康慕谊. 排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 807~811]
- [13] Zhang Jintun. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004. [张金屯. 数量生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004]
- [14] Li Jianning. The application of Path Coefficient in the study of strategies of development of education [J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2001, (8): 142~144 [李建宁. 路径分析在教育发展战略研究中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, (8): 142~144]
- [15] Houle G. A multivariate analysis of fine-scale species density in the plant communities of a saltwater lagoon—the importance of disturbance intensity [J]. *Oikos*, 2005, 111: 465~472
- [16] Tian Lianshu. Vegetation in east side of Helan [M]. Helan: Huhehaote University of Inner Mongolia Press, 1996. [田连恕. 贺兰山东坡植被 [M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1996]
- [17] Jiang Yuan, Kang Muiyi, Liu Shuai, et al. A study on the vegetation in the east side of Helan Mountain [J]. *Plant Ecology*, 2000, 149: 119~130
- [18] Wu Yide. Soil types in forest region of Ningxia mountains [J]. *Ningxia Agricultural Science and Technology*, 1982, (5): 11~17 [吴以德. 宁夏山地林区的土壤类型. 宁夏农业科技, 1982, (5): 11~17]
- [19] Liang Cunzhu, Zhu Zongyuan, Wang Wei, et al. The diversity and spatial distribution of plant communities in the Helan Mountains [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 361~368 [梁存柱, 朱宗元, 王伟, 等. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 361~368]
- [20] Zhao Yushan, Sun Ping, Zhou Xingqiang, et al. The role of Closing Hills for reforestation on eco-environment in Helan Mountains [J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2004, 27(4): 7~9 [赵玉山, 孙萍, 周兴强, 等. 封山育林对贺兰山生态环境的作用 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2004, 27(4): 7~9]
- [21] Mu Tianming. Primary study on biomass of *Picea crassifolia* forest community in Mt. Helan [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry University*, 1981, (3): 18~31 [穆天民. 贺兰山区青海云杉森林群落生物量的初步研究 [J]. 内蒙古林学院学报, 1981, (3): 18~31]
- [22] Feng Ling, Wang Lin'ing, Zhu Guoshen. Study on the types of forest community on the western side of Helan Mountain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1987, 1(3~4): 77~86 [冯林, 王立明, 朱国胜. 贺兰山西坡林型的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 1987, 1(3~4): 77~86]
- [23] Yu Yiming, Zhao Denghai, Mei Shuguang, et al. Correlation between the growth of *Picea crassifolia* and Environment in Helan Mountain Area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1999, 14(1): 16~21 [俞益民, 赵登海, 梅曙光, 等. 贺兰山区青海云杉生长与环境的关系 [J]. 西北林学院学报, 1999, 14(1): 16~21]
- [24] Li Huaizhu, Li Zhigang, Lu Haijun. Analysis of forest resources Changes in Helan Mountain of Ningxia [J]. *Ningxia Agricultural and Forestry Science and Technology*, 2000, (Suppl): 31~

- 35[李怀珠, 李志刚, 吕海军. 宁夏贺兰山森林资源变化分析 [J]. 宁夏农林科技, 2000 (增刊): 31~ 35]
- [25] Di Weizhong. *Plantae Vasculares Helanshanicae* [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1986. [狄维忠. 贺兰山维管束植物 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1986]
- [26] Zhao Yizhi. Conspectus of Flora of Vascular Plants in the west slope of Helan Shan [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Interamontolicae (Natural Science Edition)*, 1987, 18(2): 279~ 310[赵一之. 贺兰山西坡维管束植物志要 [J]. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 1987, 18(2): 279~ 310]
- [27] Jiang Yuan, Xiong Min. Vertical differentiation of plant species composition in East slope of the Helan Mountain [J]. *Resources Science*, 2002, 24(3): 49~ 53[江源, 熊敏. 贺兰山植物物种资源构成的垂直分异 [J]. 资源科学, 2002, 24(3): 49~ 53]
- [28] Xu Zhaozhai, Lin Zhiguang, Wang Yizong. Some problems of Helan Mountain climate [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(2): 171~ 176[许朝斋, 林之光, 汪奕琮. 贺兰山区气候若干问题 [J]. 地理学报, 1993, 48(2): 171~ 176]

## Path Analysis on Species Density of Coniferous Forest in Mt Helan

ZHU Yuan<sup>1</sup>, KANG Mui<sup>1</sup>, LIU Quanru<sup>2</sup>, JIANG Yuan<sup>1</sup>, SU Yun<sup>3</sup>, ZHAO Denghai<sup>3</sup>

HE Kejian<sup>1</sup>, TAO Yan<sup>1</sup>, ZHU Henfeng<sup>1</sup>, XU Guangcai<sup>1</sup>, WANG Gengui<sup>1</sup>

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University; China Ecological Assessment

Research Center at Beijing Normal University; Key Laboratory of Environmental Change and Natural

Disaster, Ministry of Education of China; Beijing 100875, China;

2. College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Administrative Bureau of the Mt Helan National-level Reserve, Alxa Zuoqi 750306, Inner Mongolia, China)

**Abstract** Path analysis is an effective method to analysis the complex interactions among variables. Based on plant communities investigations in coniferous forest of Mt Helan along altitude, path analysis has been conducted on the relationship between species density in coniferous forest and environmental factors. Then, several conclusions has been obtained. Species density changes along altitude between the east and west sides are similar. Dominant factor which influencing species density is altitude, reflecting the climatic gradient in fact. Species density decreases with altitude significantly, and the more content of organic matter in topsoil could increase the species density in coniferous forest. The species density of coniferous forest is mainly determined by herberous species, as over 70% of species are herbs. The species densities on shrubby and herbaceous layers are both influenced by altitude and organic matter content. However, the species density on shrubby layer would be varied when the slope aspect changes.

**Key words** species density; path analysis; altitude; topsoil features; Mt Helan