

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201503002

李婷婷, 张钦弟, 段晓梅, 等. 稀有种处理对 RDA 排序结果影响的比较研究[J]. 广西植物, 2015, 35(4): 539—545

Li TT, Zhang QD, Duan XM, et al. Comparative study concerning the effects of rare species treatments on RDA ordination[J]. *Guihaia*, 2015, 35(4): 539—545

# 稀有种处理对 RDA 排序结果影响的比较研究

李婷婷, 张钦弟\*, 段晓梅, 毕润成, 康艳玲

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041004)

**摘要:** 为了解稀有种对 RDA 排序结果的影响, 该研究以北京东灵山华北落叶松林调查数据为例, 在 RDA 排序的基础上, 对比分析了未处理稀有种 RDA 与剔除频度 < 5%、盖度 < 5% 的稀有种后 RDA 排序结果的差异, 并用蒙特-卡罗拟合检验分析了二者物种变量和环境变量之间的相关关系, 以及用 Spearman 秩相关系数检验了对应排序轴的相关性。结果表明: (1) 蒙特-卡罗拟合检验结果显示未处理稀有种 RDA 与剔除稀有种 RDA 各自对应的物种变量和环境变量之间均呈极显著相关关系; (2) 从排序轴特征值对物种数据方差以及物种-环境关系解释量来看, 剔除稀有种 RDA 前两排序轴与前四排序轴均有较高的物种-环境关系累积解释量; (3) 剔除稀有种前后对应排序轴的 Spearman 秩相关分析结果表明, 尽管未处理稀有种 RDA 和剔除稀有种 RDA 在第三轴和第四轴间存在一定的交叉, 但二者对应的前四排序轴均呈极显著的一一对应关系 ( $P < 0.001$ ), 相似性极高。总之, 结合物种-环境关系的累积解释量及对应排序轴的相关性可知, 在环境因子个数较少、研究尺度较小时, 使用 RDA 排序揭示植物种、植物群落和环境因子之间相互作用的生态关系时, 剔除稀有种前后 RDA 排序具有较高吻合性, 只是对环境因子的解释趋势稍有差异。

**关键词:** 植物群落; 稀有种; 冗余分析(RDA); 环境因子; Spearman 秩相关系数; 东灵山

**中图分类号:** Q948.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)04-0539-07

## Comparative study concerning the effects of rare species treatments on RDA ordination

LI Ting-Ting, ZHANG Qin-Di\*, DUAN Xiao-Mei,  
BI Run-Cheng, KANG Yan-Ling

(College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

**Abstract:** On the basis of redundancy analysis (RDA), eliminating the rare species whose frequency and coverage are less than 5% in Dongling Mountain of Beijing and our objective was to explore the effects of rare species on RDA ordination and summarizing the using-actuality of two methods. In this paper, Monte Carlo permutation test was used to analyse their relationship between species and environmental variables, and the correlation of corresponding ordination axes of two methods was measured by Spearman's rho correlation. The results were as follows: (1) The Monte Carlo permutation test results showed that their species and environmental variables had a significant correlation; (2) From the perspective of the cumulative percentage variance of species-environment relation, the RDA results of eliminating rare species had a higher amount of the inter-

收稿日期: 2015-03-03 修回日期: 2015-04-17

基金项目: 山西省青年科技研究基金(2013021030-3); 山西省化学优势重点学科建设生态化学子项目(912019); 山西师范大学校科学研究基金(ZR1218); 山西师范大学生命科学学院科学研究基金(SMYKZ-19)。

作者简介: 李婷婷(1989-), 女, 山西文水县人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究, (E-mail)xlwltt@126.com。

\*通讯作者: 张钦弟, 讲师, 主要从事植物生态学方面的教学与研究, (E-mail)nyzqd@126.com。

pretation of species-environment relationship both in the first two axes and the first four axes, therefore, it could better explain the relationship between species and the environment; (3) Two-dimensional RDA ordination diagram revealed the distribution of environmental variables, samples and species were basically the same; the results from the Spearman rank correlation of corresponding axes showed that the third axis of untreated rare species corresponded to the fourth axis of eliminating rare species and the fourth axis of untreated rare species corresponded to the third axis of eliminating rare species, whereas there were very prominent relationships between their first four axes ( $P < 0.001$ ), which revealed the same environmental gradient. In conclusion, the findings in this study suggested that the results of two methods were basically the same when the number of environmental factors was less, but some differences were existed on the explanation tendency for their environmental factor.

**Key words:** plant communities; rare species; redundancy analysis (RDA); environmental factors; Spearman rho correlation; Dongling Mountain

植被与环境因子的关系是植被生态学研究的一个中心议题。排序又叫梯度分析(Gradient analysis),是研究这种生态关系的必要手段,通过在一定空间内排列环境因素、样方和物种,使得排序轴反映一定的生态梯度,从而深刻揭示群落在一定环境梯度上的连续性,已成为植被生态学中最主要的分析方法之一(张钦弟等,2011;张金屯,2011)。目前关于植被生态学已有不少有序的排序方法,其中冗余分析(Redundancy analysis, RDA)是线性模型的直接梯度分析方法,能有效对较短环境梯度下的多个环境指标进行统计检验,并确定对群落变化具最大解释能力的最小变量组,从而更好地反映群落与环境之间的关系(Nobes *et al.*, 2008)。

群落排序时,稀有种对排序结果有较大影响,使其与实际情况相偏离(谭春旭等, 2009; 曹静等, 2015)。因此,多数研究者在进行排序时常选择压抑稀有种在群落中的指示作用,同时尽可能保留大量的生态信息(Park *et al.*, 2006)。压抑稀有种包括降低稀有种权重和剔除稀有种两种策略(Manté *et al.*, 1997; Cao *et al.*, 2001; Fodor *et al.*, 2002),由于方法原理的限制,基于线性模型的 RDA 仅能采用剔除稀有种的策略。到目前为止对于剔除稀有种的标准还没有统一的界定,有的剔除重要值小于 1 的物种,有的把所调查样地中只出现 1 次的稀有种剔除(李广良等, 2012; 牛莉芹等, 2013),还有学者剔除样方中频度  $< 5\%$  的物种(李帅锋等, 2013; 傅明珠等, 2014),而多数学者采用频度  $< 5\%$ 、盖度  $< 5\%$  的标准剔除稀有种(吴东丽等, 2005; 巨天珍等, 2012),但也有学者在排序时对稀有种不作任何处理(王增如等, 2011; 龙健等, 2012; 陈云等, 2014)。有关稀有种对排序结果的影响,赵明飞等(2010)在研究东江

干流河岸带植物群落类型分布格局时指出,稀有种多能够导致排序轴分散、排序轴信息量低;张斌等(2009)对北京小龙门林场的黄槿(*Phellodendron amurense*)群落进行分析时,赋予稀有种以较低的权重,对降低稀有种权重前后的 CCA(Canonical Correspondence Analysis)与协惯量分析进行了数据分析,结果表明 CCA 排序与协惯量分析能达到一致的分析效果,但关于稀有种处理前后 CCA 排序的差异以及稀有种对 CCA 排序结果的影响没有进行详细论述;曹静等(2015)采用 3 种不同稀有种的处理方法(剔除稀有种、稀有种不作处理、降低稀有种权重)探讨了稀有种对 CCA 排序结果的影响,完成了基于单峰模型的 CCA 排序。但有关稀有种对基于线性模型的 RDA 排序的影响还鲜有报道。为此,本文以北京东灵山华北落叶松林调查数据为例,对比分析了未处理稀有种 RDA 与剔除稀有种 RDA 排序结果的差异,试图揭示稀有种对 RDA 排序结果的影响,以期在今后 RDA 排序中稀有种的处理提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于北京市西北部门头沟区东灵山( $40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}03' \text{ N}$ ,  $115^{\circ}26' \sim 115^{\circ}30' \text{ E}$ ),与河北省毗邻,距市区约 100 km(张育新等, 2009)。东灵山为小五台山余脉,属太行山系砂岩中山区。地貌以山地侵蚀结构类型为主,土壤类型为棕壤。年降雨量为 500~650 mm。典型地带性植被是暖温带落叶阔叶林,群落优势种有椴树(*Tilia* spp.)、山杨(*Populus davidiana*)、槭树(*Acer* spp.)、核桃楸

(*Juglans mandshurica*) 以及大叶白腊 (*Fraxinus rhynchophylla*), 植物资源丰富(刘世梁等, 2003)。

## 1.2 样方调查

群落调查于 2009 年 8 月在北京东灵山进行, 选择华北落叶松典型分布的区域, 尽可能随机设置样方, 海拔调查范围为 1 000~1 400 m, 每个乔木样方大小为 10 m×10 m。在每个 10 m×10 m 乔木样方内做 2 个 5 m×5 m 灌木样方和 4 个 1 m×1 m 的草本样方。共计 36 个乔木植物群落样方。样方调查时记录乔木层的种类、树高、胸径、冠幅; 灌木层记录种类、高度、盖度等指标以及草本层植物的种类、平均高度、盖度, 本次共调查植物 155 种, 其中乔木 14 种, 灌木 36 种, 草本 106 种。同时记录样方所在地的海拔(GPS)、坡向和坡度(地质罗盘)、坡位、土壤层厚度和凋落物层厚度, 共计 6 个环境因子。

## 1.3 数据处理与分析

1.3.1 环境数据 RDA 排序的数据源为环境因子和物种数据矩阵。为便于建立环境数据矩阵, 将坡向、坡位等有序变量进行转化。转化方法为坡向:  $Aspect = \cos A + 1$ ,  $A$  为坡向数据, 用方位角  $0^\circ \sim 360^\circ$  表示(代力民等, 2008), 坡向转化后最终与海拔同做标准化处理。坡位用数字等级表示, 上位坡为 1, 中位坡为 2, 下位坡为 3(邱扬等, 2000)。其余定量变量采用实测值, 最终组成  $36 \times 6$  的环境矩阵。

1.3.2 重要值 所用数据为北京东灵山华北落叶松林调查数据, 分析时运用重要值作为植物在群落中的优势度指标, 计算公式为(朱强根等, 2009): 乔木重要值 = (相对高度 + 相对多度 + 相对基盖度) / 3; 灌木、草本重要值 = (相对高度 + 相对盖度) / 2。

1.3.3 稀有种的处理 梯度分析时采用两种不同的稀有种处理方法: (1) 保留全部物种, 即对稀有种不做任何处理(下称未处理稀有种 RDA), 得到  $155 \times 36$  维的物种重要值矩阵; (2) 剔除稀有种(以下称剔除稀有种 RDA), 采用最常见的剔除稀有种的方法, 即剔除频度  $< 5\%$ 、盖度  $< 5\%$  的物种(吴东丽等, 2005; 巨天珍等, 2012), 最后得到 55 个物种组成的  $55 \times 36$  维重要值矩阵。

1.3.4 排序方法及相关性分析 为选择合适的排序方法, 先对物种矩阵进行 DCA 排序, 分析结果中第 1 轴的梯度长度值为 2.8, 表明选择基于线性模型的排序方法较合理, 本研究选用带有环境变量的 RDA 排序(Lepš *et al.*, 2003)。在 RDA 环境因子排序图中, 环境因子用带有箭头的线段表示, 箭头连线的长

短以及箭头连线与排序轴的夹角共同反映环境因子与该区群落的相关性大小。

1.3.5 结果来源及检验方法 DCA 和 RDA 排序均在国际通用的 Canoco4.5 软件包中实现。排序轴之间的相关性检验借助 SPSS11.5 的 Spearman 秩相关完成; 剔除稀有种前后物种变量和环境变量之间的显著性用 Canoco 软件包中的蒙特-卡罗拟合检验(Monte Carlo permutation test), 拟合次数为 999 次(Lepš *et al.*, 2003; Chessel *et al.*, 2004)。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒙特-卡罗检验结果与排序轴特征值的比较

分别对未处理稀有种 RDA 和剔除稀有种 RDA 的排序轴做蒙特-卡罗拟合检验, 结果表明二者各自的物种变量和环境变量之间的  $F$  值都达到了极显著水平( $P < 0.01$ ), 即环境因子对群落的物种组成有极显著影响。

RDA 分析给出了前四排序轴的特征值(表 1), 分别从前两轴和前四轴来看, 剔除稀有种 RDA 的物种-环境关系的累积解释量均高于未处理稀有种 RDA。因此, 从排序轴特征值对物种-环境关系的解释量来看, 剔除稀有种 RDA 能更好地解释物种与环境之间的关系。由表 1 还可知, 二者前两轴分别解释了物种-环境关系的 73.5% 和 74.8%, 均反映了排序的绝大多数信息。因此, 采用前两轴作 RDA 排序图效果显著。

### 2.2 环境因子排序图的比较

对记录的坡度、坡向、坡位、土壤层厚度、枯枝落叶层厚度、海拔 6 个环境因子作 RDA 排序图(图 1), 结合图 1 和环境因子与排序轴相关系数表(表 2)可知, 未处理稀有种 RDA 与剔除稀有种 RDA 前四排序轴所揭示的生态意义一致, 其中第一排序轴均主要体现了海拔、凋落物层厚度和坡度的变化且达到极显著水平( $P < 0.001$ ), 第二排序轴均与坡位、坡度达极显著相关( $P < 0.001$ )。

基于环境变量坐标值, 采用 Spearman 秩相关系数对两者的前四排序轴做相关分析。表 3 结果表明, 二者 RDA 对应的前四轴均为极显著相关( $P < 0.001$ ), 剔除稀有种前后 RDA 排序轴具有较高的吻合性; 而未处理稀有种 RDA 第四排序轴与剔除稀有种 RDA 第三排序轴间存在显著的相关关系( $P < 0.05$ ), 第三排序轴和第四排序轴在剔除稀有种前后

表 1 各排序轴的特征值及对物种-环境关系解释的累积百分比

Table 1 Eigenvalues of the ordination axes and the cumulative percentage variance of species-environment relation explained by ordination axes

比较项目 Comparative item	稀有种处理 Treatment of rare species	RDA 排序轴 Ordination axes of RDA				典范特征值之和 Sum of all canonical eigenvalues
		第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4	
特征值 Eigenvalue	未处理稀有种 RDA Untreated rare species RDA	0.193	0.122	0.064	0.030	0.429
	剔除稀有种 RDA Eliminating rare species RDA	0.206	0.129	0.067	0.029	0.448
对物种数据方差的累积百分比 Cumulative percentage variance of species data (%)	未处理稀有种 RDA Untreated rare species RDA	19.30	31.50	37.90	40.90	
	剔除稀有种 RDA Eliminating rare species RDA	20.60	33.50	40.20	43.10	
对物种-环境关系方差 解释的累积百分比 Cumulative percentage variance of species-environment relation (%)	未处理稀有种 RDA Untreated rare species RDA	45.00	73.50	88.40	95.30	
	剔除稀有种 RDA Eliminating rare species RDA	46.00	74.80	89.80	96.30	

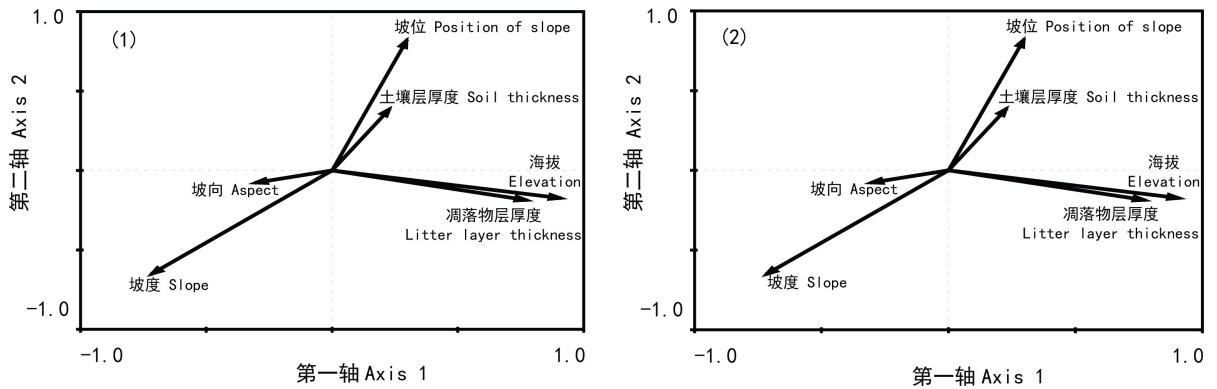


图 1 两种稀有种的处理得出 RDA 环境因子排序图(示第一轴和第二轴) (1) 未处理稀有种 RDA; (2) 剔除稀有种 RDA。下同。  
Fig. 1 Ordination diagrams of environmental variables in untreated rare species RDA and eliminating rare species RDA (for axis 1 and axis 2) (1) Untreated rare species RDA; (2) Eliminating rare species RDA. The same below.

表 2 环境因子与 RDA 前四排序轴的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between environmental variables and RDA ordination axes

环境因子 Environmental variable	RDA 排序轴(未处理稀有种 RDA) Ordination axes of RDA(Untreated rare species RDA)				RDA 排序轴(剔除稀有种 RDA) Ordination axes of RDA(Eliminating rare species RDA)			
	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4
坡度 Slope	-0.7340 ***	-0.6260 ***	0.0429	0.0330	-0.7139 ***	-0.6474 ***	0.0475	0.0489
坡向 Aspect	-0.2953	-0.0584	-0.5268 ***	-0.5374 ***	-0.2990	-0.0752	-0.5274 ***	-0.5473 ***
海拔 Elevation	0.9006 ***	-0.2030	0.2980	-0.2290	0.9031 ***	-0.1729	0.2962	-0.2416
坡位 Slope position	0.3214	0.8030 ***	0.4902 **	0.0571	0.2964	0.8159 ***	0.4868 **	0.0486
土壤层厚度 Soil thickness	0.2349	0.3727 *	0.4486 **	0.2563	0.2264	0.3835 *	0.4381 **	0.2544
凋落物层厚度 Litter layer thickness	0.7579 ***	-0.2089	0.3799 *	0.2091	0.7678 ***	-0.1851	0.3874 *	0.1815

注: \* 表示相关性在 0.05 水平上显著; \*\* 表示相关性在 0.01 水平上显著; \*\*\* 表示相关性在 0.001 水平上显著。下同。

Note: \* Showing that the correlation of ordination axes is significant at 0.05 level; \*\* Showing that the correlation of ordination axes is significant at 0.01 level; \*\*\* Showing that the correlation of ordination axes is significant at 0.001 level. The same below.

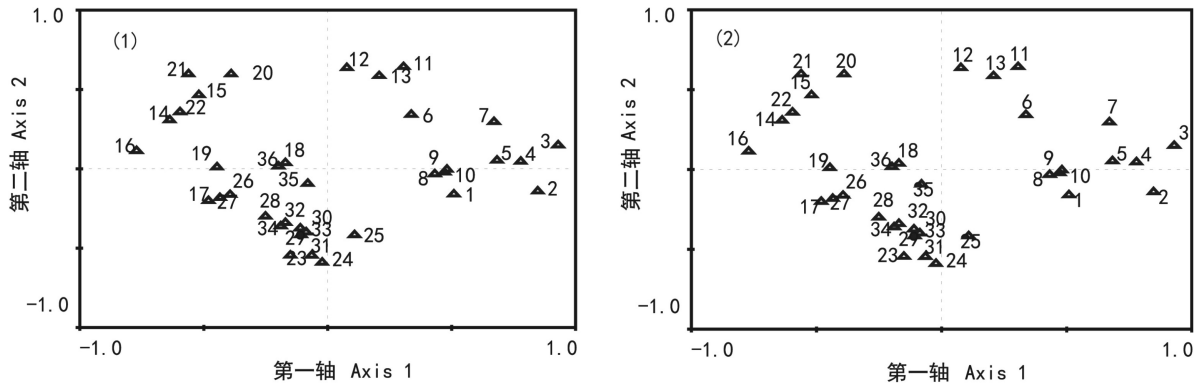


图 2 两种稀有种的处理得出的 RDA 样方排序图 (示第一和第二排序轴)

图中数字 1~36 代表样方编号。

Fig. 2 Ordination diagrams of samples in untreated rare species RDA and eliminating rare species RDA (for axis 1 and axis 2) In the figure, number 1-36 represent sample number.

表 3 基于环境变量坐标值得到的对应前四排序轴的 Spearman 秩相关系数

Table 3 Spearman's rho correlation of the first four ordination axes based on the scores of environmental variables

RDA 排序轴 (未处理稀 有种 RDA) Ordination axis of RDA (Untreated rare species RDA)	RDA 排序轴 (剔除稀有种 RDA) Ordination axes of RDA (Eliminating rare species RDA)			
	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4
第一轴 AX1	1.000 ***	0.143	0.429	-0.029
第二轴 AX2	0.143	1.000 ***	0.600	-0.086
第三轴 AX3	0.429	0.600	1.000 ***	0.543
第四轴 AX4	0.143	0.200	0.771 *	0.953 ***

存在一定程度的交叉现象。

### 2.3 样方排序图的比较

从图 2 可以看出, 36 个样方在剔除稀有种前后的分布格局基本一致, 如样方 14、15、16、20、21 和 22 都位于两图的左上侧且相对分离出来, 体现了独特的群落结构与环境特点, 而位于两图左下侧的样方分布较为集中, 相互之间关系紧密, 这是由他们各自相近的群落结构所决定的。

对剔除稀有种前后 RDA 排序得到的样方坐标值各自对应的排序轴进行相关性分析, 由表 4 和表 5 可知, 无论基于物种数据得到的样方坐标值, 还是基于环境数据得到的样方坐标值, 二者对应的前四排序轴均呈极显著的一一对应关系 ( $P < 0.001$ )。

### 2.4 物种排序图的比较

图 3 为优势物种的排序图, 如图 3 所示, 23 个优势种在剔除稀有种前后的分布基本一致: 如胡桃

表 4 基于物种数据得到的样方坐标值对应排序轴的 Spearman 秩相关系数

Table 4 Spearman's rho correlation of the first four ordination axes based on the sample scores from species data

RDA 排序轴 (未处理稀 有种 RDA) Ordination axis of RDA ( Untreated rare species RDA)	RDA 排序轴 (剔除稀有种 RDA) Ordination axes of RDA (Eliminating rare species RDA)			
	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4
第一轴 AX1	0.998 ***	0.046	-0.176	-0.010
第二轴 AX2	-0.015	0.996 ***	0.107	-0.046
第三轴 AX3	-0.172	0.118	0.998 ***	-0.054
第四轴 AX4	0.067	-0.039	-0.047	0.989 ***

表 5 基于与环境数据线性合并后的样方坐标值对应排序轴的 Spearman 秩相关系数

Table 5 Spearman's rho correlation of the first four ordination axes based on the sample scores which are linear combinations of environmental variables

RDA 排序轴 (未处理稀 有种 RDA) Ordination axis of RDA (Untreated rare species RDA)	RDA 排序轴 (剔除稀有种 RDA) Ordination axes of RDA (Eliminating rare species RDA)			
	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4
第一轴 AX1	0.999 ***	-0.012	-0.052	0.045
第二轴 AX2	-0.071	0.997 ***	0.036	-0.066
第三轴 AX3	-0.059	0.059	0.999 ***	0.052
第四轴 AX4	0.048	-0.063	-0.110	0.999 ***

楸 (*Juglans mandshurica*) 和小花溲疏 (*Deutzia parviflora*) 均远离其他物种位于排序图的最上端; 华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、等齿委陵菜 (*Potentilla simulatrix*)

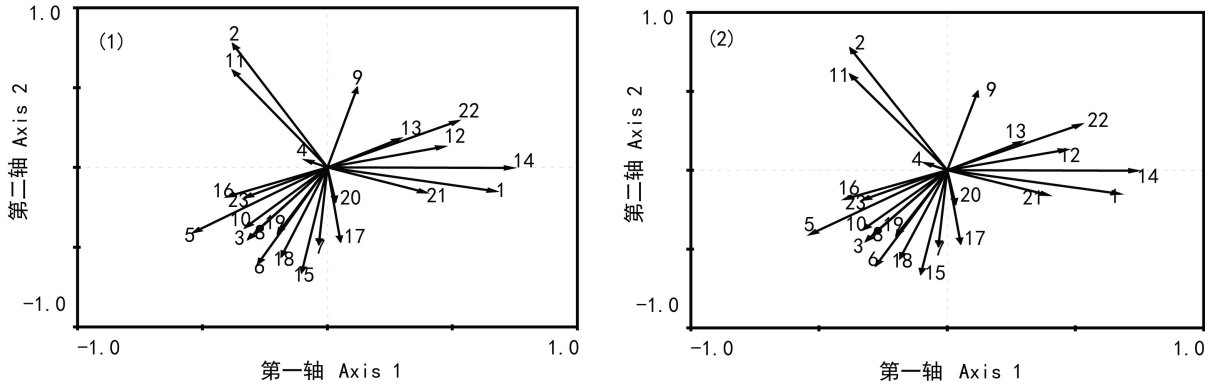


图 3 两种稀有种的处理得出的 RDA 物种二维排序图 物种编号见表 7; 由于该排序图中列出所有物种太紧凑, 所以图中所示物种为重要值大于 1 的物种。

Fig. 3 Two-dimensional RDA ordination diagram of the main dominant species Number of species is equal to what in Table 7; Since the ordination contained all species tare cluttered, only species with the important value over one are shown.

表 6 基于物种数据得到的样方坐标值对应排序轴的 Spearman 秩相关系数

Table 6 Spearman's rho correlation of the first four ordination axes based on the sample scores from species data

RDA 排序轴 (未处理 稀有种 RDA) Ordination axe of RDA (Untreated rare species RDA)	RDA 排序轴 (剔除稀有种 RDA) Ordination axes of RDA (Eliminating rare species RDA)			
	第一轴 AX1	第二轴 AX2	第三轴 AX3	第四轴 AX4
第一轴 AX1	0.998 ***	0.112	0.001	-0.091
第二轴 AX2	0.056	0.999 ***	0.145	0.196
第三轴 AX3	0.004	0.155	0.999 ***	0.280 *
第四轴 AX4	-0.062	0.209	0.290 *	0.998 ***

均位于排序图的右部, 体现了相似的生境需求。

由于剔除稀有种前后物种数不等, 为了检验基于物种坐标的排序轴在剔除稀有种前后的相关性, 本研究采用剔除稀有种后的物种, 即二者相同的 55 个物种的坐标值做 Spearman 秩相关分析(表 6), 结果显示二者对应的前四排序轴间均呈极显著的相关关系( $P < 0.001$ ), 而第三排序轴和第四排序轴在剔除稀有种前后存在一定程度的交叉现象, 表现在未处理稀有种 RDA 第三、第四排序轴分别与剔除稀有种 RDA 第四、第三排序轴间存在显著的相关关系( $P < 0.05$ ), 说明物种分布在第三、第四排序轴上更多地受到坡向的影响。表 7 显示了 RDA 排序图中重要值大于 1 的物种。

### 3 讨论

植物群落排序的目的是在种的多维空间内, 放

置群落样地以使它的空间轴代替潜在的环境梯度并产生有意义的生态解释, 从而可以很好地揭示植被或植物种的分布与环境变量之间的关系(梁士楚等, 2001)。在环境梯度较短时, 物种对环境梯度的响应呈线性关系, 使用基于线性模型的梯度分析方法较为适宜。本文采用 DCA 检验第一轴梯度长度为  $2.8 < 3$ , 表明可以使用基于线性模型的 RDA (Lepš *et al.*, 2003)。RDA 排序由于结合了环境数据, 排序图不仅反映了各样方的生境特性, 而且可以指示样方与环境因子之间的相互关系以及物种间的关联性, 从而准确揭示植物种、植物群落和环境因子之间的生态规律(Braak *et al.*, 2002)。该研究是在 RDA 排序的基础上剔除了群落中出现的稀有种, 来探讨剔除稀有种前后 RDA 排序效果的差异以及稀有种对 RDA 排序结果的影响, 并通过特征值对物种数据方差以及物种-环境关系解释量、Spearman 秩相关系数对排序结果进行了比较。

特征值是衡量排序轴重要性的指标, 根据特征值累积值与特征值总和的比值可计算出物种-环境关系累积解释量, 进而反映物种与环境之间的相关性(代力民等, 2008; 朱强根等, 2009)。表 1 列出了剔除稀有种前后的物种-环境关系解释的累积百分比, 分析可知, 剔除稀有种后 RDA 前两排序轴和前四排序轴均有较高的物种-环境关系累积解释量, 表明稀有种多容易造成排序分散、排序轴信息量低, 这与赵鸣飞等(2010)的观点相吻合。

RDA 排序可以将环境因子、样方、物种排列在坐标平面上, 结果较为直观。本研究在 RDA 排序的基础上剔除群落中出现的稀有种后所得的排序图

表 7 RDA 排序图中重要值大于 1 的物种

Table 7 Species in RDA ordination diagram whose important values are over one

序号 Order	种名 Species name	科名 Family name	属名 Generic name
1	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	松科 Pinaceae	落叶松属 <i>Larix</i>
2	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	桃科 Juglandaceae	胡桃属 <i>Juglans</i>
3	黑桦 <i>Betula dahurica</i>	桦木科 Betulaceae	桦木属 <i>Betula</i>
4	大叶白蜡树 <i>Fraxinus rhynchophylla</i>	木犀科 Oleaceae	栲属 <i>Fraxinus</i>
5	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>
6	蒙古栎(灌木) <i>Q. mongolica</i> (shrub)	壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>
7	大叶白蜡(灌木) <i>Fraxinus rhynchophylla</i> (shrub)	木犀科 Oleaceae	栲属 <i>Fraxinus</i>
8	黑桦(灌木) <i>Betula dahurica</i> (shrub)	桦木科 Betulaceae	桦木属 <i>Betula</i>
9	小叶鼠李 <i>Rhamnus parvifolia</i>	鼠李科 Rhamnaceae	鼠李属 <i>Rhamnus</i>
10	钩齿溲疏 <i>Deutzia hamata</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	溲疏属 <i>Deutzia</i>
11	小花溲疏 <i>D. parviflora</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	溲疏属 <i>Deutzia</i>
12	土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i>	蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>
13	大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i>	榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>
14	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>
15	照山白 <i>Rhododendron micranthum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	杜鹃属 <i>Rhododendron</i>
16	六道木 <i>Abelia biflora</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	六道木属 <i>Abelia</i>
17	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	茜草科 Rubiaceae	茜草属 <i>Rubia</i>
18	银背风毛菊 <i>Saussurea nivea</i>	菊科 Compositae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>
19	东亚唐松草 <i>Thalictrum minus</i> var. <i>hypoleucum</i>	毛茛科 Ranunculaceae	唐松草属 <i>Thalictrum</i>
20	野青茅 <i>Deyeuxia arundinacea</i>	禾本科 Gramineae	野青茅属 <i>Deyeuxia</i>
21	大油芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i>	禾本科 Gramineae	大油芒属 <i>Spodiopogon</i>
22	等齿委陵菜 <i>Potentilla simulatrix</i>	蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>
23	大披针藁草 <i>Carex lanceolata</i>	莎草科 Cyperaceae	藁草属 <i>Carex</i>

与未处理稀有种 RDA 排序图(环境因子、样方、物种排序图)具有极高的相似性。Spearman 秩相关系数作为一种统计指标,可以很好地验证两因素之间的相关程度(万黎等,2008)。该研究对剔除稀有种前后的对应排序轴进行了 Spearman 秩相关分析,结果表明:无论是基于环境数据、物种数据,还是基于样方数据,未处理稀有种 RDA 与剔除稀有种 RDA 二者对应的前四排序轴间均为极显著的一一对应关系( $P < 0.001$ ),四个排序轴所反映的环境梯度相同,剔除稀有种前后 RDA 排序所揭示的生态规律具有高度的一致性;而基于环境数据和物种数据分析时,剔除稀有种前后 RDA 第三轴和第四轴存在一定程度的交叉现象,但是二者第三、第四排序轴所反映的环境因子的变化趋势是一致的,均主要体现了坡向的变化,也说明环境因素对物种分布具有限制作用,所以在环境因子个数较少的情况下,二者分析效果是相吻合的。

同时,尝试以重要值  $< 5\%$  的标准剔除 36 个物种再进行 RDA 排序,排序结果与未处理稀有种 RDA 进行比较,结果表明:以重要值  $< 5\%$  的标准剔

除稀有种前后二者对应的前四排序轴均为极显著相关,但剔除稀有种后前两排序轴与前四排序轴均具有较高的物种-环境关系累积解释量,可以更好地体现种与环境的相关性;与剔除频度  $< 5\%$ 、盖度  $< 5\%$  的物种的排序结果相比,不仅两种剔除方法得到的对应排序轴物种-环境关系累积解释量相当,并且对应的排序轴表现出高度的一致性,特别是基于环境数据和样方数据分析时对应排序轴的秩相关系数为 1,基于物种数据得到的前两排序轴也完全相同。

该研究区域物种分布零散,稀有种所占比例较大,按频度  $< 5\%$ 、盖度  $< 5\%$  的标准,共得到稀有种 100 个。但是剔除稀有种前后 RDA 排序结果相似度高,特别是基于环境数据分析时,二者对应的前三排序轴完全相同。可能是由于 RDA 排序能够最大限度地精简环境变量,直接将感兴趣的环境因素作为约束条件进行排序分析,进而大幅度削弱环境变量的作用,即“人为”地将稀有种对群落的贡献视为 0(尹锴等,2009)。因此,该文对剔除稀有种前后的环境数据、样方数据、物种数据的对应排序轴分析时均为极显著相关。综上,本研究以东灵山华北落

叶松林调查数据为例,综合分析了剔除稀有种前后 RDA 排序结果的差异,结果表明,使用 RDA 排序揭示种群生态规律时,以频度 $<5\%$ 、盖度 $<5\%$ 的标准剔除稀有种前后得到的排序结果具有极高的吻合性,只是对环境因子的解释趋势稍有差异。此外,由于本研究涉及环境因子较少,研究尺度较小,能否外推剔除稀有种前后 RDA 排序结果差异不大的结论,有待于进一步探讨。

## 参考文献:

- Cao J (曹静), Miao YM (苗艳明), Feng F (冯飞), *et al.*. 2015. Comparison of different treatments of rare species in canonical correspondence analysis (稀有种不同处理对典范对应分析排序结果影响的比较) [J]. *Chin J Plant Ecol* (植物生态学报), **39**(2): 167–175
- Cao Y, Larsen DP, Thorne RJ. 2001. Rare species in multivariate analysis for bioassessment; some considerations [J]. *J N Am Benthol Soc*, **20**: 144–153
- Chen Y (陈云), Wang HL (王海亮), Han JW (韩军旺), *et al.*. 2014. Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqingling (小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **34**(8): 2 068–2 075
- Chessel D, Dufour AB, Thioulouse J. 2004. The ade4 package-I: one table method [J]. *R New*, **4**: 5–10
- Dai LM (代力民), Tang LN (唐立娜), Cao YM (曹玉明), *et al.*. 2008. Quantitative classification and ordination aiming to realize ecological land classification for the Mountainous Region in eastern Liaoning Province (辽东山区生态土地分类中的植物群落数量分析) [J]. *Sci Silv Sin* (林业科学), **44**(3): 6–12
- Fodor IK, Kamath C. 2002. Dimension reduction techniques and the classification of bent double galaxies [J]. *Comp Stat & Data Anal-CS&DA*, **41**(1): 91–122
- Fu MZ (傅明珠), Sun P (孙萍), Sun X (孙霞), *et al.*. 2014. Phytoplankton community structure and its ecological responses to environmental changes in Jinzhou Bay, China (锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **34**(13): 3 650–3 660
- Ju TZ (巨天珍), Wang Y (王彦), Ren HF (任海峰), *et al.*. 2012. Classification, ordination, and succession of secondary forest in Xiaolongshan National Nature Reserve in west Qinling (小陇山国家级自然保护区次森林分类、排序及演替) [J]. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **31**(1): 23–29
- Lepš J, Šmilauer P. 2003. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press
- Li GL (李广良), Cong J (丛静), Lu H (卢慧), *et al.*. 2012. Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve (神农架川金丝猴栖息地森林群落数量分类与排序) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **32**(23): 7 501–7 511
- Li SF (李帅锋), Su JR (苏建荣), Liu WD (刘万德), *et al.*. 2013. Quantitative classification of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* communities and their species richness in relation to the environmental factors in Yunnan Province of Southwest China (云南省思茅松林群落数量分类及物种多样性与自然环境的的关系) [J]. *Chin J Ecol* (生态学报), **32**(12): 3 152–3 159
- Liang SC (梁士楚), Zhang WY (张炜银). 2001. Nonlinear ordination of mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi (广西英罗港红树植物群落的非线性排序) [J]. *Guihaia* (广西植物), **21**(3): 228–232
- Liu SL (刘世梁), Ma KM (马克明), Fu BJ (傅伯杰), *et al.*. 2003. The relationship between landform, soil, characteristics and plant community structure in the Dongling Mountain Region, Beijing (北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究) [J]. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), **27**(4): 496–502
- Long J (龙健), Liao HK (廖洪凯), Li J (李娟), *et al.*. 2012. Relationships between soil and rocky desertification in typical karst mountain area based on redundancy analysis (基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究) [J]. *Environ Sci* (环境科学), **33**(6): 2 131–2 138
- Manté C, Durbec J, Dauvin J. 1997. Analysis of temporal changes in macrobenthic communities on the basis of probable species presence [J]. *Acta Oceanol Sin*, **20**: 71–79
- Niu LQ (牛莉芹), Cheng ZH (程占红), Xiu HW (秀洪伟). 2013. Quantitative classification and ordination of the wetland vegetation in Wutai Mountain (五台山景区湿地植被的数量分类和排序) [J]. *J NW For Univ* (西北林学院学报), **28**(4): 16–20
- Nobes K, Uthicke S, Hendsen R. 2008. Is light the limiting factor for the distribution of benthic bearing foraminifera on the Great Barrier Reef? [J]. *J Experim Mar Biol Ecol*, **363**(1–2): 48–57
- Park YS, Tison J, Lek S, *et al.*. 2006. Application of a self-organizing map to select representative species in multivariate analysis: A case study determining diatom distribution patterns across France [J]. *Ecol Inform*, **1**(3): 247–257
- Qiu Y (邱扬), Zhang JT (张金屯). 2000. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities (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]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **20**(2): 199–206
- Tan CX (谭春旭). 2009. Classification and analysis of soil factor for *Aeluropus littoralis* var. *sinensis* community in Songnen grassland (松嫩草地箨毛群落分类与土壤因子分析) [D]. Dongbei Normal University (东北师范大学)
- Ter Braak C J F, Mlilaure P. 2002. Canoco Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Ver. 4.5) [M]. Ithaca NY: Microcomputer Power
- Wan L (万黎), Mao BQ (毛炳启). 2008. Batch calculation of Spearman rank correlation coefficient (Spearman 秩相关系数的批量计算) [J]. *Environ Prot Sci* (环境保护科学), **34**(5): 53–55
- Wang ZR (王增如), Yang GJ (杨国靖), He XB (何晓波), *et al.*. 2011. Relationship between plant community and environmental factors in the source Regions of Yangtze River (长江源区植物群落与环境因子的关系) [J]. *J Glaciol & Geocryol* (冰川冻土), **33**(3): 640–645