

秦岭牛背梁植物物种多样性垂直分布格局

唐志尧 柯金虎

(北京大学环境学院生态学系, 北京大学生态学研究与教育中心, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 基于秦岭山脉中段牛背梁自然保护区南北坡垂直样带 51 个样方的调查资料, 利用植被数量分析方法 (TWINSpan 和 DCA) 对牛背梁植物群落进行了分类和排序, 并分析了植物物种多样性沿海拔梯度的分布格局。结果表明, 牛背梁的植被群落具有明显的海拔梯度格局, 从低海拔到高海拔依次分布有: 锐齿槲栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) 林, 桦木 (*Betula* spp.) 林, 巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 林和亚高山灌丛。海拔梯度是牛背梁山区制约植物群落分布的主要因子, 而坡向和坡度则起到次要作用。对物种多样性的分析表明, 物种总数、木本植物物种多样性和草本植物物种多样性在南北坡具有不同的海拔梯度格局。物种总数在南坡呈现单峰分布格局, 而在北坡分布趋势不明显; 木本植物物种多样性在南北坡具有相似的分布格局: 在低海拔沿海拔梯度变化不明显, 而在高海拔则随海拔上升而急剧下降; 草本植物物种多样性在南北坡沿海拔梯度变化的规律不明显。 β 多样性沿海拔梯度先减少后增加, 形成两端高中间低的格局, 说明中海拔地区生境条件较为均一, 低海拔地区的人为活动增加了生境的异质性, 而高海拔地区的生态过渡特性增加了物种的更替速率以及群落的相异性。

关键词: β 多样性, DCA, TWINSpan, 海拔梯度, 物种多样性

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-0094(2004)01-0108-07

Altitudinal patterns of plant species diversity in Mt. Niubeiliang, Qinling Mountains

TANG Zhi-Yao, KE Jin-Hu

Department of Ecology, College of Environmental Sciences, Center for Ecological Research & Education, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Using quantitative analysis (DCA and TWINSpan), the vegetation and plant species diversity patterns along the elevation gradient in Mt. Niubeiliang, Qinling Mountains were studied based on 51 plots along two altitudinal transects between 1500 m and 2800 m on northern and southern slopes. Plant communities varied continuously along the elevation gradient. From low to high elevation, mountain oak forest, mountain birch forest, subalpine fir forests and subalpine shrub occurred on both slopes. Relationship between communities and topographic variables were analyzed by detrended correspondence analysis (DCA). Elevation was the primary determinant of floristic composition in Mt. Niubeiliang, and followed by exposure. In terms of species diversity, different patterns existed among total number of species, woody species richness and herbaceous species richness, and also between southern and northern slopes. The total number of species changed unimodally with elevation on the southern slope, peaking at middle elevations. No significant relationship between total number of species and elevation was detected on the northern slope. Woody species richness changed similarly on both southern and northern slopes, keeping stable at low elevations and decreasing monotonically with the increasing elevation at high elevations. In contrast, no significant pattern of herbaceous plant richness existed along the elevation gradient. β diversity was higher at lower and higher elevations than in the mid-altitudinal zone, indicating a more homogeneous habitat at middle elevation than upper and lower elevations. Human disturbance at lower elevation

and the timberline ecotone at higher elevations may contribute to the increase of β diversity in these areas.

Key words: β diversity, DCA, altitudinal gradient, species diversity, TWINSpan

生物多样性沿环境梯度的变化规律是生物多样性研究的一个重要话题(Kratochwil, 1999),而物种多样性则是生物多样性的本质内容,其分布格局主要与气候、群落生产力和其他因子(如区域地理历史演化、群落演替等)相关(Odland & Birks, 1999; O'Brien *et al.*, 2000)。大尺度的研究表明,生物多样性分布格局主要受植被历史和演化的影响(Qian & Ricklefs, 1999; Ricklefs & Schluter, 1993)。对不同层次的多样性比较表明,植物群落不同层次的多样性对环境响应不尽一致(Rey Benayas, 1995);不同生活型的物种由于受到不同因子的制约也呈现不同的梯度格局(Ojeda *et al.*, 2000; Hamilton & Perrott, 1981)。贺金生和陈伟烈(1997)总结了四类在区域尺度上影响物种多样性分布格局的生态因子,这些生态因子之间相互作用,在研究多样性的梯度特征时很难加以区分,而垂直海拔梯度由于包含了温度、湿度和光照等各种环境因子而成为生物多样性梯度格局研究的重要方面。山地植物群落的物种多样性随海拔高度的变化规律一直是生态学家感兴趣的问题,一般认为,物种多样性的海拔梯度格局反映了与纬度梯度格局相同的变化规律,即随着海拔的上升物种多样性降低。以往大部分关于物种多样性沿海拔梯度分布格局的研究工作集中于热带山地,而忽略了温带山地(Kessler 2000; Wilson *et al.*, 1996)。

秦岭山脉地处我国暖温带和亚热带的生态过渡带(中国植被图编委会, 2001),在生物多样性的生态地理区划中处于东亚落叶阔叶林亚区、东亚常绿阔叶林亚区以及黄土高原森林草原亚区的生态交错带,同时也是我国生物多样性分布的中心地区之一(倪健等, 1998),对其植被垂直带的分布进行研究有利于更好地认识我国南北部植被分异(傅志军等, 1996)。

1 自然概况

调查样带牛背梁位于秦岭山脉东段,介于 $108^{\circ}45' - 109^{\circ}03' E$ $33^{\circ}47' - 33^{\circ}56' N$ 之间,主峰牛背梁海拔 2802 m,为秦岭山脉东段主脊最高峰。本区地处暖温带和亚热带之间的过渡地带,镇安气象站

(海拔 697 m $33^{\circ}26' N$ $109^{\circ}09' E$)年均温 $12.4^{\circ}C$, 7 月均温 $23.6^{\circ}C$, 1 月均温 $1.0^{\circ}C$, 年降水量 768 mm, 降水主要集中在 7、8、9 三个月(图 1)。土壤由低山至亚高山依次为:黄棕壤(800 - 1300 m),棕壤(1300 - 2400 m),暗棕壤(2400 - 2800 m)。牛背梁自然保护区共记录种子植物 950 种(含种下等级),隶属于 105 科 433 属。其中木本植物 372 种,草本植物 578 种。特有现象明显,有 12 个中国特有属,占整个区域总属数的 3.1%(李景侠等, 1999)。牛背梁的植被垂直带谱较为明显:2100 m 以下为中低山典型落叶阔叶林(栓皮栎林和锐齿槲栎林带);2100 m - 2600 m 为中山落叶阔叶小叶林带(红桦和牛皮桦林带);2600 m 以上为亚高山寒温性针叶林带(巴山冷杉林带)(王长科, 1994)。

2 研究方法

在南北坡海拔 1500 - 2800 m 之间,沿海拔梯度每隔 50 m 设置一个样方。乔木层调查样方面积为 $20 m \times 30 m$,在样方中进行每木调查,记录树种、胸径、树高、盖度,并记录样方中出现的所有木本物种。在每个乔木样方中选取 $10 m \times 10 m$ 的小样方对灌木层进行调查,记录样方中灌木种类及其多度、盖度、高度,并记录样方中的草本物种。共调查样方 51 个,记录种子植物 300 种,分属于 77 科 204 属。其中木本植物 122 种(含木质藤本),草本植物 178

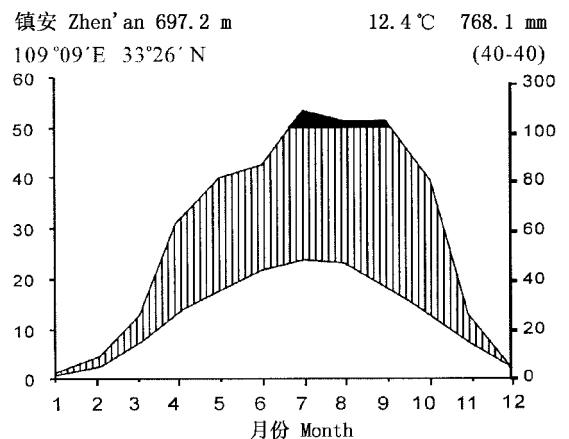


图 1 秦岭牛背梁地区的气候特征
Fig. 1 Climate diagram of Mt. Niubeiliang, Qinling Mountains

种(含草质藤本),分别占记录植物总种数的 40.5% 和 59.5%。

多样性的分析包括 α 多样性和 β 多样性。 α 多样性采用物种丰富度,即样方中出现的物种数目来测度,它是生物多样性的本质内容;而 β 多样性可以用来分析多样性沿环境梯度不同生境之间群落的变化速率,并用以反映不同群落间物种组成的差异。本文中 β 多样性采用 Cody 指数和 Jaccard 相异性系数(β_{cj})来测度(方精云等 2004)。其计算公式分别为:

$$\beta_r = [g(H) + \kappa(H)] / 2$$

$$\beta_{cj} = 1 - 2j / (a + b)$$

其中 β_r 为 Cody 指数 $g(H)$ 为沿生境梯度 H 增加的物种数 $\kappa(H)$ 为沿生境梯度 H 失去的物种数。在本项研究中,生境梯度指海拔梯度,则 $g(H)$ 为在该海拔到达分布上限的物种数,而 $\kappa(H)$ 则为在该海拔到达分布下限的物种数。 β_{cj} 为群落相异性系数 j 为两群落共有的物种数 a 、 b 分别为两群落各自的物种数(马克平,1994)。

对木本植物的重要值以二元指示种分析(TWINSPAN)进行群落分类,同时以去趋势对应分析(DCA)进行群落排序,以获取植物群落分布的环境梯度(Hill,1979;Hill & Gauch Jr.,1980)。

3 结果与讨论

3.1 群落分类与排序

牛背梁山区植被以森林为主,沿海拔梯度表现出明显的垂直分布格局,自下而上依次为落叶栎林、落叶桦木林和亚高山针叶林。以 TWINSPAN 对牛背梁 51 个由木本物种组成的样方进行分类的结果表明,牛背梁自然保护区的植被可以划分为 4 个植被类型:第一级划分,以杯腺柳(*Salix cupularis*)为指示种,将亚高山灌丛划分出来;第二级划分,以锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、陕甘花楸(*Sorbus koehneana*)、秦岭蔷薇(*Rosa tsinglingensis*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)为指示种,将锐齿槲栎林划分出来;第三级划分,以巴山冷杉为指示种,划分为巴山冷杉林和桦木林;在锐齿槲栎林中,将南北坡的群落类型划分开;而在桦木林中,以华山松(*Pinus armandii*)为指示种,划分出南北坡的差异:红桦(*Betula albo-sinensis*)、华山松混交林普遍出现在南坡。

牛背梁海拔 1500 - 2100 m 之间的地带性群落类型为锐齿槲栎林,气候为山地暖温性气候,土壤为棕壤。锐齿槲栎为优势种,主要的伴生种有陕西鹅耳枥(*Carpinus shensiensis*)、胡桃楸(*Juglans cathayensis*)、青榨槭(*Acer davidii*)、秦岭白蜡(*Fraxinus paxiana*)等。在较为湿润的地段,分布有以锐齿槲栎为优势种的落叶杂木林,常见树种有:冬瓜杨(*Populus purdomii*)、领春木(*Euptelea pleiosperma*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等。灌木层以木姜子(*Litsea pungens*)、白檀(*Symplocos paniculata*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、藏刺榛(*Corylus ferox* var. *thibetica*)等占优势。

桦木林为海拔 2100 - 2550 m 之间的地带性植物群落,大致可细分为红桦林和糙皮桦(*Betula utilis*)林,糙皮桦分布海拔普遍比红桦高。在牛背梁,由于人为活动较为强烈,桦木林一般与华山松一起构成次生的针阔混交林。灌木层优势种为桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)、长柄八仙花(*Hydrangea longipes*)、蚂蚱腿子、秦岭蔷薇。

巴山冷杉林是海拔 2500 m 以上的地带性植物群落,是牛背梁自然保护区保存比较完整的一个垂直带。巴山冷杉林下灌木优势种为:华桔竹(*Fargesia spathacea*)、金背杜鹃(*Rhododendron clementinae* subsp. *aureodorsale*);草本优势种有禾叶蒿草(*Kobresia graminifolia*)、大叶碎米荠(*Cardamine macrophylla*)。主要群落类型有两种:普遍分布于南坡的冷杉-华桔竹群落和北坡的冷杉-金背杜鹃群落。

亚高山灌丛主要分布在海拔 2700 m 以上的牛背梁顶,不构成地带性植被,优势种为头花杜鹃(*Rhododendron capitatum*)、杯腺柳(*Salix cupularis*)、银露梅(*Potentilla arbuscula* var. *veitchii*);草本层以紫苞风毛菊(*Saussurea iodostegia*)及禾叶蒿草为主。

DCA 前四个轴的特征值分别为 0.77、0.57、0.30 和 0.18。DCA 排序的结果表明:沿排序第一轴从低往高依次分布有锐齿槲栎林、红桦林、冷杉林以及高山灌丛。而沿第二轴,每一种植被类型分布又可以按坡向划分开来,大致结果为北坡群落的第二轴值大于南坡(图 2)。DCA 各轴排序值与地形之间的相互关系表明,影响 AX1 值的主要因素为海拔,同时坡度也与 AX1 值显著相关;而 AX2 值则与坡向显著相关,说明海拔梯度是制约牛背梁植物群

表 1 DCA 排序值与地形变量的相关系数

Table 1 Correlation between DCA axes and topographic variables

	特征值 Eigenvalue	海拔 ALT	坡向 ASPE	坡度 Slope
AX1	0.774	$r = 0.93, P < 0.001$	$r = -0.13, P = 0.36$	$r = -0.57, P < 0.001$
AX2	0.565	$r = 0.06, P = 0.69$	$r = -0.68, P < 0.001$	$r = -0.13, P = 0.37$
AX3	0.295	$r = 0.06, P = 0.65$	$r = 0.16, P = 0.27$	$r = -0.17, P = 0.25$
AX4	0.178	$r = 0.08, P = 0.59$	$r = -0.19, P = 0.18$	$r = 0.11, P = 0.43$

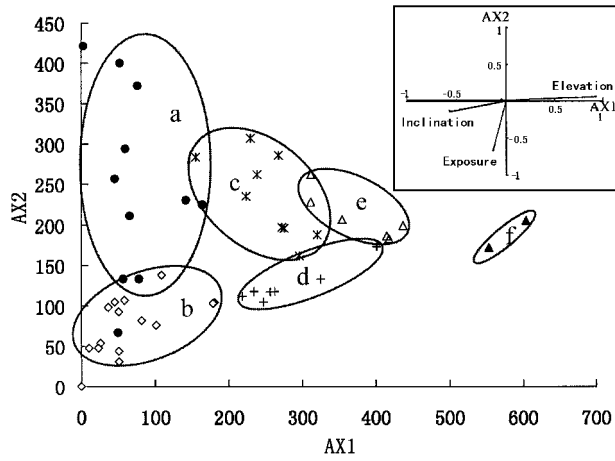


图 2 牛背梁植物群落沿 DCA 排序第一和第二轴的分布规律(植被类型依据 TWINSpan 分类结果)

Fig. 2 Diagram of plots along the first and second axes of DCA ordination

(a): 锐齿槲栎-木姜子群落(●), 主要分布于北坡;(b): 锐齿槲栎-胡枝子群落(◇), 主要分布于梁南坡;(c): 红桦林-六道木群落(*), 主要分布于北坡;(d): 红桦林-蚂蚱腿子群落(+), 主要分布于南坡;(e): 冷杉林(△);(f): 头花杜鹃灌丛(▲)。右上角指示地理因子与排序第一第二轴的相关系数。

Community classes are based on the cluster of TWINSpan, (a) *Quercus aliena* var. *acuteserrata*-*Litsea pungens* community (●); (b) *Quercus aliena* var. *acuteserrata*-*Lespedeza formosa* community (◇); (c) *Betula albo-sinensis*-*Abelia dielsii* community (*); (d) *Betula albo-sinensis*-*Myrica dioica* community (+); (e) *Abies fargesii* community (△); (f) *Rhododendron capitatum* community (▲). The diagram in the upper right indicates the correlation between DCA axes and environmental variables.

落分布的主要因子, 而坡度和坡向为次要因子(表 1)。随着海拔升高, 气温呈近似线性的降低; 而坡向则主要表现为湿度的差异: 牛背梁处于亚热带湿润气候区域与暖温带半干旱气候的交错带, 其南北坡具有明显的湿度梯度。在相同海拔, 南坡比北坡湿度大。

3.2 α 多样性随海拔分布的规律

物种多样性沿海拔梯度在南北坡呈现不同的分

布格局: 在南坡, 物种多样性随海拔呈单峰分布格局, 即多样性在中海拔地区比高、低海拔地区大, 最高值出现在海拔 2200–2400 m 之间; 而在北坡, 在海拔 2100 m 以下, 物种多样性沿海拔梯度变化不明显, 在 2100 m 以上, 物种多样性随着海拔的升高而降低(图 3a, b)。

木本植物物种多样性在南、北坡随海拔梯度变化的趋势比较相似。在南坡 2100 m 以下, 沿着海拔梯度的变化, 木本植物的物种数变化不大; 但在 2100 m 以上, 物种数随着海拔的升高而急剧减少。在北坡, 物种多样性随海拔的升高一直下降, 但递减速率在高海拔和低海拔相差较大: 在 2200 m 以下, 递减速率较小; 高于 2200 m 后, 物种数随海拔升高而急剧减少(图 3c, d)。

草本植物多样性随海拔梯度变化的规律不明显。在北坡, 最大值出现在海拔 2150 m 的红桦林以及海拔 2800 m 的冷杉林; 而最小值则出现在海拔 1750 m 和海拔 2400 m。在南坡, 最大值出现在海拔 2650 m 的冷杉林以及海拔 1850 m 的锐齿槲栎林和海拔 2250 m 的红桦林, 最小值分别在海拔 1500 m 和 2400 m 处。在南坡最大值处于群落交错带中, 而在北坡最大值处于开阔森林中, 南、北坡的最小值均出现在人为活动极为强烈的低海拔地区和中海拔华桔竹盖度大的地段(图 3e, f)。

南北坡之间物种多样性的比较表明: 对于木本植物, 在中高海拔地区, 南北坡在相同海拔具有近似的物种多样性; 但在低海拔地区(低于 2300 m), 北坡物种多样性比南坡高。而对于草本植物, 南北坡的物种多样性之间不存在显著的差异。造成木本植物多样性差异的主要原因在于牛背梁南坡低海拔地区强烈的人为活动: 在北坡, 主要的人为活动是采药和砍竹, 对下层植物有较大的影响, 但并不能从根本上影响群落结构; 而在南坡, 除了这两类影响外, 由于森林内种植经济作物而对锐齿槲栎林的砍伐则

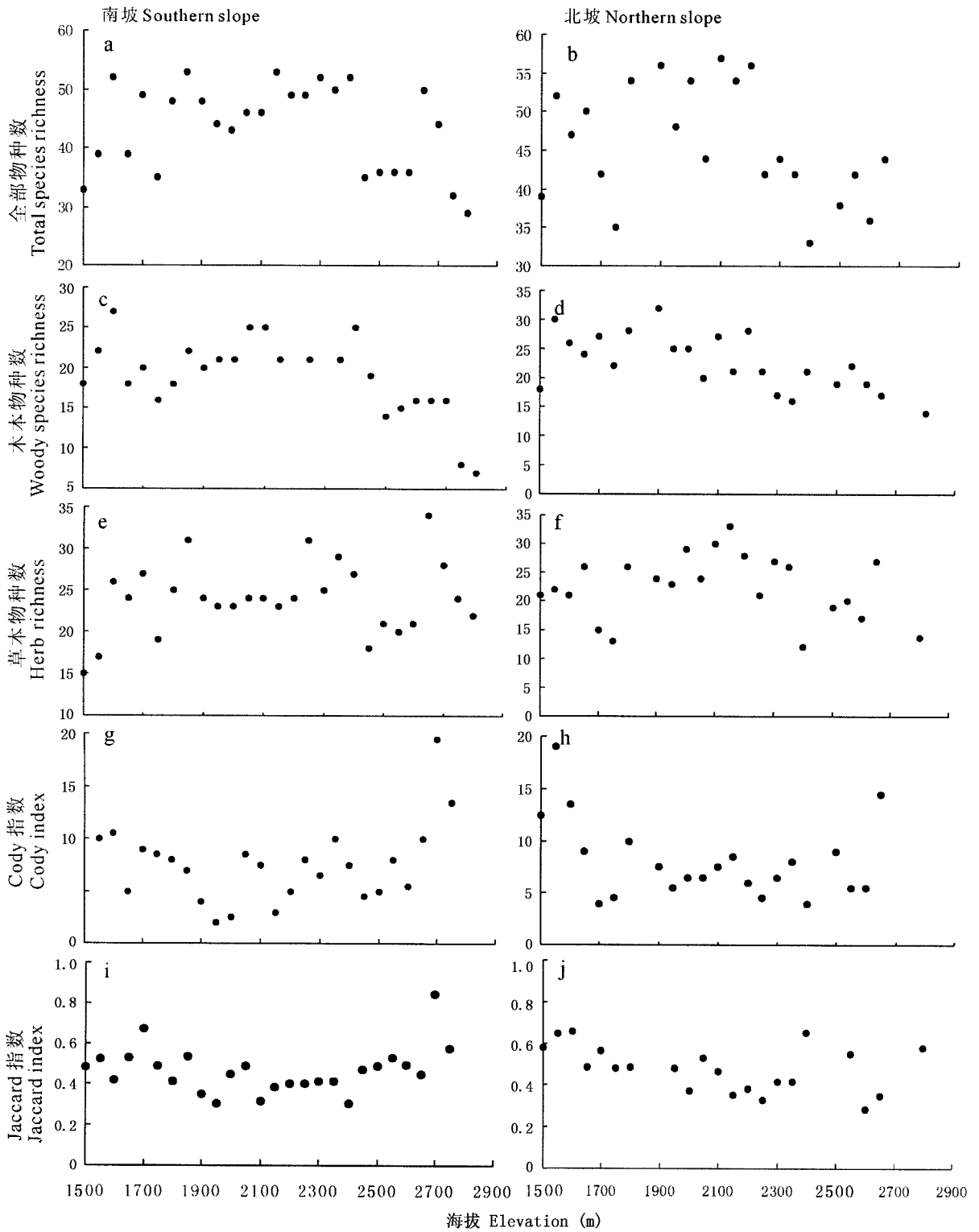


图3 牛背梁植物群落 α 多样性和 β 多样性沿海拔梯度的变化格局

图中 a, c, e, g, i 分别为南坡物种总数、木本物种数、草本物种数、Cody 指数和 Jaccard 群落相异性指数随海拔梯度的变化, b, d, f, h, j 分别为北坡物种总数、木本物种数、草本物种数、Cody 指数、Jaccard 群落相异性指数随海拔梯度的变化

Fig. 3 Elevation patterns of plant diversity in Mt. Niubeiliang

a, c, e, g and i indicate the species richness, woody species richness, herbaceous species richness, Cody index, and Jaccard dissimilarity index on the southern slope, respectively, and b, d, f, h and j for those parameters on the northern slope, respectively.

严重影响到森林结构。虽然随着保护力度的加大, 这些人为活动已大为减小, 但其影响短期内还难以消除。

3.3 β 多样性随海拔分布的规律

3.3.1 Cody 指数分布格局

Cody 指数体现了物种沿整个海拔梯度的更替量, 表现了潜在的 β 多样性。与物种丰富度的分布格局不同, Cody 指数沿海拔分布出现两端高中间低的格局(图 3g, h), 说明了山体高海拔地区和低海拔地区的生境多样性较中海拔地区高。从亚高山针叶林到亚高山灌丛的生态过渡带是一条最显著的交错带, 在该交错带中, 无论南坡或北坡, Cody 指数均最大, 表明物种分布在该处有明显的更替, 进一步表明了生境的显著变化。在牛背梁, 虽然不具备严格意义上的亚高山灌丛带, 但是亚高山灌丛群落比较普遍, 存在亚高山灌丛与亚高山暗针叶林的生态过渡带, 因此具有较高的物种更替量。而低海拔地区由于人为活动剧烈且生境异质性较强, 增强了生境的异质化, 从而具有较大的 β 多样性(Wang *et al.*, 2002)。

3.3.2 Jaccard 指数分布格局

Jaccard 指数体现了相邻植物群落之间物种更替的速率, 从而间接指示 β 多样性的大小。Jaccard 相异性系数与 Cody 指数的分布规律相似, 在中海拔地区最低, 而在低海拔和高海拔地区较高, 说明中海拔地区具有相对均一的生境, 而高海拔和低海拔地区生境异质性较大(图 3i, j)。

3.4 与其他山体的比较

在牛背梁的研究结果与在太白山研究的结果较为一致: 随着海拔的升高, 木本植物物种多样性减少, 而草本植物物种多样性不具有明显的海拔梯度格局(唐志尧等 2004)。木本植物物种多样性主要体现了气温等区域尺度的气候特征, 而草本植物物种多样性则主要受制于群落结构等局地尺度特征。岳明等(1999)在秦岭南坡佛坪自然保护区的研究也表明, 群落结构对于层下植物的多样性有很大影响, 中海拔地区的竹类盖度的增加引起中海拔地区植物物种多样性的降低。与本研究结果相一致, 佛坪自然保护区各群落类型的多样性随海拔升高而降低。

Wang *et al.* (2002) 在半干旱地区的祁连山区研究结果表明, α 多样性随海拔的增加呈单峰分布格

局, 而 β 多样性随海拔升高而降低。Tang & Ohsawa (1997) 在湿润地区的峨眉山也发现树种丰富度随着海拔呈现单峰分布格局。但两项研究对产生这一格局的原因解释不同: 在祁连山低海拔地区, 控制物种多样性的因子主要为湿度, 由于降水的限制, 难以形成木本植物丰富的森林植被, 因而以草原为基带; 而在高海拔地区, 由于气温降低, 难以维持较多的物种。而在峨眉山区, 形成这一格局的主要原因有取样面积以及次生林的影响, 同时, 还应考虑梯度长度的影响, Tang & Ohsawa (1997) 的研究梯度可能反映了局部梯度的小尺度格局。与 Ohsawa (1995) 的结论相一致, 作者认为在不同的气候条件下, 物种多样性具有不同的梯度格局。

β 多样性的分布格局在牛背梁与在其他山区研究的结果不太一致。在太白山(唐志尧等 2004) 和祁连山(Wang *et al.* 2002), β 多样性随着海拔的升高而降低, 形成这一格局的主要因素有气候条件和人类干扰。与小五台山相似, 牛背梁并未达到形成地带性高山灌丛(草甸)的高度, 由于山体效应的影响, 山顶带处于地带性暗针叶林与非地带性的亚高山灌丛的交错带, 从而引起 β 多样性的增加, 使得 β 多样性沿海拔梯度呈现出两端高中间低的单谷分布格局。中度干扰一方面减少了 α 多样性, 同时由于引起生境的异质化而增加了 β 多样性。

与太白山相比较, 在相同海拔或者植被类型中, 牛背梁南坡木本植物丰富度比太白山南坡低, 但北坡却比太白山北坡高; 而草本植物丰富度在南北坡都比太白山低(唐志尧等 2004)。形成这一格局的主要原因在于人为活动强度的差异: 在牛背梁, 人为活动主要集中在南坡; 而太白山则主要集中在北坡。

4 结论

牛背梁山区具有锐齿槲栎林、桦木林、巴山冷杉林以及亚高山灌丛四种主要的植被类型, 海拔梯度是影响植物群落分布的主要因子, 而坡向和坡度为次要因子。不同生活型的物种沿海拔梯度具有不同的分布格局: 木本植物物种多样性随着海拔的升高而降低, 而草本植物物种多样性沿海拔梯度没有明显的分布规律。 β 多样性随着海拔的升高先减少后增加, 从而形成两端高中间低的格局, 低海拔的干扰和高海拔的过渡特性增加了这些区域的 β 多样性。

致谢:野外工作得到牛背梁国家级自然保护区管理局的支持,中科院西北植物所吴振海高级工程师帮助鉴定植物标本,作者对他们的帮助表示感谢。

参考文献

- Editorial Board of Vegetation Map of China (中国植被图编委会). 2001. *Vegetation Atlas of China* (中国植被图集). Science Press, Beijing.
- Fang, J. Y. (方精云), Shen, Z. H. (沈泽昊), Tang, Z. Y. (唐志尧) and Wang, Z. H. (王志恒). 2004. The Protocol for the Survey Plan for Plant Species Diversity of China's Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**: 5 - 9.
- Fu, Z. J. (傅志军), Zhang, X. Y. (张行勇), Liu, S. Y. (刘顺义) and Tao, M. (陶铭). 1996. The summarize of research on the flora and vegetation of the Qinling Mountain Range. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), **16**: 93 - 106. (in Chinese)
- Hamilton, A. C. and Perrott, R. A. 1981. A study of altitudinal zonation in the montane forest belt of Mt. Elgon, Kenya/Uganda. *Vegetatio*, **45**: 107 - 125.
- He, J. S. (贺金生) and Chen, W. L. (陈伟烈). 1997. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **17**: 91 - 99. (in Chinese)
- Hill, M. O. 1979. *TWINSPAN - A FORTRAN Program for Arranging Multivariate Data in An Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Hill, M. O. and Gauch, Jr. H. G. 1980. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio*, **42**: 47 - 58.
- Kessler, M. 2000. Altitudinal gradients in species richness and endemism of selected plant groups in the central Bolivian Andes. *Plant Ecology*, **149**: 181 - 193.
- Kratochwil, A. 1999. Biodiversity in ecosystems: some principles. In: Kratochil, A. (ed.), *Biodiversity in Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 5 - 38.
- Li, J. X. (李景侠), Cai, J. (蔡靖), Zhang, W. H. (张文辉) and Zhou, J. Y. (周建赟). 1999. Study on diversity of seed plants from Niubeiliang Nature Reserve. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), **19**: 37 - 43. (in Chinese)
- Ma, K. P. (马克平). 1994. The measurement of community diversity. In: Qian, Y. Q. (钱迎倩) and Ma, K. P. (马克平) (eds.), *Principles and Methodologies of Biodiversity Studies*. China Science and Technology Press, Beijing, 141 - 165. (in Chinese)
- Ni, J. (倪健), Chen, Z. X. (陈仲新), Dong, M. (董鸣), Chen, X. D. (陈旭东) and Zhang, X. S. (张新时). 1998. An ecogeographical regionalization for biodiversity in China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **40**: 370 - 382. (in Chinese)
- O'Brien, E. M., Field, R. and Whittaker, R. J. 2000. Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation and topography. *Oikos*, **89**: 588 - 600.
- Odland, A. and Birks, H. J. B. 1999. The altitudinal gradient of vascular plant richness in Aurland, western Norway. *Ecography*, **22**: 548 - 566.
- Ohsawa, M. 1995. Latitudinal comparison of altitudinal changes in forest structure, leaf-type, and species richness in humid monsoon Asia. *Vegetatio*, **121**: 3 - 10.
- Ojeda, F., Maranon, T. and Arroyo, J. 2000. Plant diversity patterns in the Aljebe Mountains (S. Spain): a comprehensive account. *Biodiversity and Conservation*, **9**: 1323 - 1343.
- Qian, H. and Ricklefs, R. E. 1999. A comparison of the taxonomic richness of vascular plants in China and the United States. *American Naturalist*, **154**: 160 - 181.
- Rey Benayas, J. M. 1995. Patterns of diversity in the strata of boreal montane forest in British Columbia. *Journal of Vegetation Science*, **6**: 95 - 98.
- Ricklefs, R. E. and Schluter, D. 1993. Species diversity: regional and historical influences. In: Ricklefs, R. E. and Schluter, D. (eds.), *Species Diversity in Ecological Communities*. University of Chicago Press, Chicago, 350 - 363.
- Tang, C. Q. and Ohsawa, M. 1997. Zonal transition of evergreen, deciduous, and coniferous forests along the altitudinal gradient on a humid subtropical mountain, Mt. Emei, Sichuan, China. *Plant Ecology*, **133**: 63 - 78.
- Tang, Z. Y. (唐志尧), Fang, J. Y. (方精云) and Zhang, L. (张玲). Patterns of woody plant species diversity along environmental gradients on Mt. Taibai, Qinling Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**: 115 - 122.
- Wang, C. K. (王长科). 1994. Division of vertical zones of vegetation in the middle and upper reach of Xunhe River Basin on the south face of Qinling Mountain. *Journal of Yantai Normal University (Natural Science)* [烟台师范学院学报(自然科学版)], **10**: 217 - 222. (in Chinese)
- Wang, G. H., Zhou, G. S., Yang, L. M. and Li, Z. Q. 2002. Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China. *Plant Ecology*, **165**: 169 - 181.
- Wilson, J. B., Allen, R. B. and Hewitt, A. E. 1996. A test of the humped-back theory of species richness in New Zealand native forest. *New Zealand Journal of Ecology*, **20**: 173 - 177.
- Yue, M. (岳明), Ren, Y. (任毅), Dang, G. D. (党高弟) and Gu, T. Q. (辜天琪). 1999. Species diversity of higher plant communities in Foping National Reserve. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **7**: 263 - 269. (in Chinese)