

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

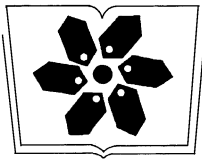
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第8期 Vol.33 No.8 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 8 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态系统研究专题

- 城市生态系统:演变、服务与评价——“城市生态系统研究”专题序言 王效科 (2321)
- 城市生态景观建设的指导原则和评价指标 孙然好,陈爱莲,李 芬,等 (2322)
- 城市绿色空间格局的定量化方法研究进展 陶 宇,李 锋,王如松,等 (2330)
- 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例 赵 丹,李 锋,王如松 (2343)
- 基于市政综合监管信息的城市生态系统复杂性分析 董仁才,苟亚青,刘 昕 (2350)
- 原位生物技术对城市重污染河道底泥的治理效果 柳 敏,王如松,蒋 莹,等 (2358)
- 北京城区道路沉积物污染特性 任玉芬,王效科,欧阳志云,等 (2365)
- 绿地格局对城市地表热环境的调节功能 陈爱莲,孙然好,陈利顶 (2372)
- 北京城区气传花粉季节分布特征 孟 龄,王效科,欧阳志云,等 (2381)

个体与基础生态

- 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响 徐 翠,张林波,杜加强,等 (2388)
- 土壤砷植物暴露途径的土壤因子模拟 线 郁,王美娥,陈卫平 (2400)
- 不同寄主植物对马铃薯甲虫的引诱作用 李 超,程登发,郭文超,等 (2410)
- 蒙古栎、白桦根系分解及养分动态 靳贝贝,国庆喜 (2416)
- 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响 王 林,冯锦霞,王双霞,等 (2425)
- 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响 符利勇,孙 华,张会儒,等 (2434)
- 驯化温度与急性变温对南方鲢幼鱼皮肤呼吸代谢的影响 鲜雪梅,曹振东,付世建 (2444)

种群、群落和生态系统

- 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局 何艳华,闫 明,张钦弟,等 (2452)
- 玉龙雪山白水 1 号冰川退缩迹地的植被演替 常 丽,何元庆,杨太保,等 (2463)
- 五花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响 王 刚,杨文斌,王国祥,等 (2474)
- 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响 何友均,梁星云,覃 林,等 (2484)
- 入侵植物黄顶菊生长、再生能力对模拟天敌危害的响应 王楠楠,皇甫超河,李玉浸,等 (2496)
- 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测 刘志理,金光泽 (2505)
- 草地植物群落最优分类数的确定——以黄河三角洲为例 袁 秀,马克明,王 德 (2514)
- 多毛类底栖动物在莱州湾生态环境评价中的应用 张 莹,李少文,吕振波,等 (2522)
- 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性 杨大星,杨茂发,徐 进,等 (2531)

景观、区域和全球生态

- 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系 张 杰,张 强,唐从国 (2545)

基于多源遥感数据的景观格局及预测研究..... 赵永华,贾 夏,刘建朝,等 (2556)

城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.....

..... 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等 (2565)

资源与产业生态

碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力——基于浙江和江西两省调查.....

..... 朱 臻,沈月琴,吴伟光,等 (2577)

基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究..... 刘国顺,常 栋,叶协锋,等 (2586)

春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用..... 麻雪艳,周广胜 (2596)

城乡与社会生态

广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力 刘 璐,管东生,陈永勤 (2604)

研究简报

桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应..... 刘自刚,沈 冰,张 雁 (2615)

基质养分对寄生植物南方菟丝子生长的影响 张 静,李钧敏,闫 明 (2623)

学术信息与动态

人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评..... 宋 亮,刘文耀 (2632)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-04



封面图说: 互花米草近景——互花米草是多年生高大禾本科植物,植株健壮而挺拔,平均株高约 1.5m,最高可达 3.5m,茎秆直径可达 1cm 以上。原产于大西洋沿岸,是一种适应海滩潮间带生长的耐盐、耐淹植物。我国于 1979 年开始引入,原意主要是用于保滩护堤、促淤造陆和改良土壤等。但是,近年来,互花米草迅速扩散,在一些区域里,已经完全郁闭,形成了单优种群,严重排挤了本土物种的生长,并且还在以指数增长的速度逐年增加,对海岸湿地土著物种和迁徙鸟类造成的危害日益严重,已经列为必须严格控制的有害外来入侵物种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208181163

何艳华, 闫明, 张钦弟, 张直峰, 苗艳明, 毕润成. 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局. 生态学报, 2013, 33(8): 2452-2462.

He Y H, Yan M, Zhang Q D, Zhang Z F, Miao Y M, Bi R C. Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2452-2462.

五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局

何艳华, 闫明, 张钦弟, 张直峰, 苗艳明, 毕润成*

(山西师范大学生命科学学院, 临汾 041004)

摘要:在五鹿山国家级自然保护区典型地段设立样地,以植物群落样地调查数据为基础,计算不同层次的多样性指数,运用广义可加模型分析各物种多样性的海拔格局。结果表明:乔木层的胸高截面积沿海拔呈显著递增趋势($P < 0.05$); α 多样性,乔木层丰富度指数、香浓维纳指数、均匀度指数都呈显著的单峰分布格局($P < 0.01$),灌木层丰富度指数、香浓维纳指数大体呈以中高海拔 1507m 为峰值的偏峰分布格局,均匀度指数大体呈显著递增趋势($P < 0.05$),草本层丰富度指数、香浓维纳指数较低海拔下随海拔升高递减,较高海拔下变化不大,均匀度指数大体呈递增趋势; β 多样性大体呈“~”型变化; γ 多样性,大体呈单峰分布格局。沿海拔梯度升高,水热组合发生变化,地带性植被以及群落内的建群种和优势种都发生了变化。

关键词:五鹿山自然保护区;植物多样性;广义可加模型;海拔格局;多样性指数

Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China

HE Yanhua, YAN Ming, ZHANG Qindi, ZHANG Zhifeng, MIAO Yanming, BI Runcheng*

College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China

Abstract: Wulu Mountain Nature Reserve is located between the western margin of the North China Plain and the eastern margin of the Loess Plateau, and shows distinct transitional vegetation types and high species richness. Thus the reserve has an important role to play in plant biodiversity research. In the present study we investigated the plant species distribution along an altitudinal gradient in the Wulu Mountain Nature Reserve in October, 2010. The vegetation zones and dominant species in each community changed with increasing elevation, and a combination of rainfall and temperature determined the major communities in the forests. The plant communities were classified as *Robinia pseudoacacia* forest, *Pinus bungeana* forest, mixed conifer-broadleaf forest, and *Quercus liaotungensis* forest. We investigated the species composition of plant communities in different plots to discern patterns of species diversity and distribution along the altitudinal gradient. We calculated α -diversity, β -diversity and γ -diversity using the data collected from the study plots and analyzed with a generalized additive model to examine the following relationships: 1) changes in the total number of trunks and diameter at breast height in all forest plots along the altitudinal gradient; 2) species richness in the tree, shrub and herbaceous layers with altitude; 3) the Shannon-Wiener diversity index for the tree, shrub and herbaceous layers with altitude; 4) Pielou's evenness index for the tree, shrub and herbaceous layers with altitude; 5) β -diversity for the tree, shrub and herbaceous layers with altitude; 6) γ -diversity with altitude; and 7) the relationships of grass species richness with total number of trunks and diameter at breast height in all forest plots. The results showed that total number of trunks and diameter at breast height in all forest plots increased with the increase in elevation. Species richness, the Shannon-Wiener diversity index and

基金项目:山西省化学优势重点学科建设项目(912019);山西师范大学校基金(ZR1211)

收稿日期:2012-08-18; 修订日期:2013-02-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxrcbi@126.com

Pielou's evenness index for the tree layer were significantly higher in mixed conifer-broadleaf forest at middle elevations ($P < 0.01$). Species richness and the Shannon-Wiener diversity index of the shrub layer both peaked at 1507 m but were also relatively high at 1160 and 1260 m, whereas Pielou's evenness index of the shrub layer increased with the increase in elevation ($P < 0.05$). In contrast, species richness and the Shannon-Wiener diversity index of the herbaceous layer decreased with the increase in elevation except at lower elevations, owing to the significant influence of forest canopy cover, whereas no differences in species richness and the Shannon-Wiener diversity index of the herbaceous layer were observed at higher elevations. Pielou's evenness index of the herbaceous layer increased with the increase in elevation. The Shannon-Wiener diversity index over the entire altitudinal gradient showed the rank order: herbaceous layer > shrub layer > tree layer. Beta-diversity showed peaks at middle and high elevations. Gamma-diversity was highest at 1400—1500 m altitude. Aridity at low altitudes and low temperature at high altitudes limited species survival, and only middle elevations experienced favorable precipitation and temperatures to support high plant species diversity. The species richness of grasses decreased with the increase in total number of trunks and diameter at breast height in all forest plots.

Key Words: Wulu Mountain Nature Reserve; plant species diversity; generalized additive model; vertical distribution pattern; diversity index

生物多样性格局与生态因子之间的关系一直是生态研究的热点领域^[1]。物种多样性可以和许多生态梯度结合起来^[2],海拔梯度包含了温度、水分和光照等因素的影响^[3],而且在海拔梯度上温度的变化速率要比在纬度梯度上快 1000 倍^[4]。物种多样性的海拔梯度格局,可反映出物种的生物学、生态学特性、分布状况及其对环境的适应性^[5]。近年来对植物多样性沿海拔梯度分布格局的研究较多^[6-9]。一些研究表明物种多样性在中海拔达到最大(单峰格局)^[6]、而另一些研究则表明随海拔升高物种多样性逐渐下降^[7]或与海拔无关^[8]不同山地和不同生活型的物种多样性海拔分布格局不同,这可能与山地所处的区域环境条件、山体的相对高度和地质地貌等众多因素有关^[9]。五鹿山自然保护区先后被批准成立为省级、国家级自然保护区^[10],主要保护以褐马鸡为主的野生动物和白皮松林、辽东栎林为主的森林生态系统^[11]前人已经对它的主要植被类型和分布^[12],种子植物名录^[13]等进行了研究。五鹿山保护区地理位置的特殊性使得其在植物区系组成上表现为南北过渡、东西交汇的特点,具有复杂性、多样性、过渡性和特殊性。但近年来由于人口压力以及大规模的经济开发,保护区生物多样性逐年锐减,白皮松、辽东栎林的破坏严重,褐马鸡最适宜的栖息地逐渐缩小^[11],因此加强保护迫在眉睫。本文以五鹿山自然保护区植被垂直带谱的调查数据为基础,分析其乔木层、灌木层和草本层的 α 多样性、 β 多样性以及总物种的 γ 多样性在海拔梯度上的分布格局。以期为五鹿山自然保护区的保护提供理论基础同时也为阐明山地植物多样性的垂直分布格局积累基础资料。

1 研究区概况

五鹿山自然保护区地处吕梁山南端,蒲县和隰县交界处,位于 $36^{\circ}23'45''$ — $36^{\circ}38'20''N$, $111^{\circ}8'$ — $111^{\circ}18'E$ 之间。全区面积 20617.3 hm^2 ,主要山峰有尖山、红军寨、沙冒顶等,山势险要,沟大谷深,主峰五鹿山最高海拔 1946.3 m。该区位于暖温带季风型大陆性气候区,是东南季风区的边缘。年平均气温 8.7 $^{\circ}C$,极端最高气温 36.4 $^{\circ}C$,极端最低气温 -23.2 $^{\circ}C$ 。无霜期 150—180 d。降水量年均 500—560 mm 左右,最高 899.5 mm,最低 346.4 mm。保护区内的土壤呈明显的垂直分布,在区内自上而下土壤类型共分为棕壤、褐土、草甸土、山地草甸土 4 个土类^[11]。

2 研究方法

2.1 样地设置

2010 年 10 月在研究区内选择有代表性的山体,从山麓 1040m 到山顶 1877m 沿海拔梯度设置样地,每隔 100m 设置 3 个样地,在物种比较丰富的地段增设 1 个样地。每个样地包含 4 个 10m×10m 的乔木样方,每个乔木样方的对角线两个角上分别设一个 5m×5m 的灌木样方,四角及中心分别设一个 1m×1m 的草本样方。

共设置样地 30 个(图 1)。其中包括乔木样方 120 个,灌木样方 240 个,草本样方 600 个。具体调查指标包括:乔木层的种类、胸径、树高、冠幅;灌木层的种类、高度、盖度;草本层的种类、平均高度、盖度;样方所在地的经度、纬度、海拔、坡度、坡向、坡位等指标。

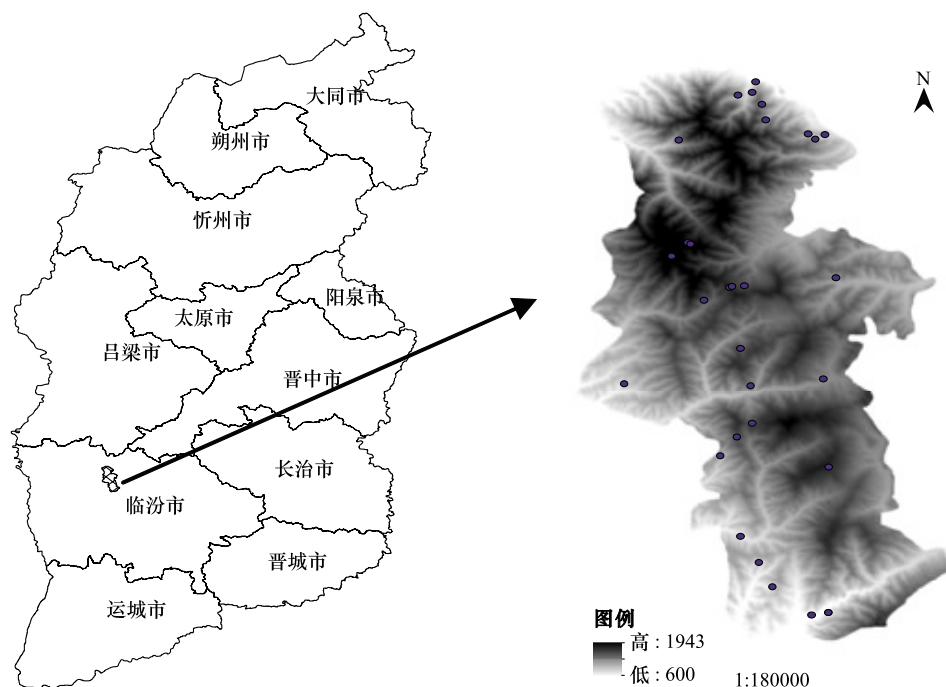


图 1 研究区及样地的地理位置

Fig. 1 The location of study area and the investigated plots

2.2 数据处理

分别计算每个样地内乔木层、灌木层、草本层的 α 多样性、 β 多样性、总物种的 γ 多样性以及乔木层的胸高截面积。计算方法如下:

α -多样性

(1) Patrick 丰富度指数

$$D = S$$

(2) Shannon-Wiener 多样性指数

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

(3) Pielou 均匀度指数

$$J' = \frac{H'}{H_{\max}}, H_{\max} = \ln S$$

式中, S 为样方内的物种数目; P_i 为种 i 的相对重要值, $P_i = \frac{N_i}{N}$; N_i 为种 i 的重要值; N 为种 i 所在样方的各个种的重要值之和。

β -多样性

β 多样性指沿环境梯度不同生境群落之间物种组成的相异性或物种沿环境梯度的更替速率^[14]。文中选取 Sørensen 相异性指数来反映 β -多样性, 公式如下:

$$S = 1 - \frac{2W}{a + b}$$

式中, S 为 Sørensen 相异性指数, a 和 b 分别为样方 i 和 j 内物种数目, W 为两个样方内的共有种数目。研究中将五鹿山自然保护区植物群落以 100 梯度为间隔分段, 计算海拔间群落物种相异性指数。

γ -多样性

1972 年 Whittaker 将 γ 多样性定义为在一个地理范围(如一个景观、一个岛屿等)内各生境中的物种丰富度^[15]多指区域或大陆尺度的物种数量。该方法一直沿用至今,将五鹿山自然保护区植物群落从山脚至山顶以 100 梯度为间隔划分为 9 个海拔带,以每个海拔梯度中总物种数目(总物种丰富度 S)来表示区域内的 γ 多样性。

乔木层的胸高截面积

乔木层的胸高截面积(cm^2/m^2),即每个样方内所有乔木胸高(距地面高 1.3m)处的树干截面积之和。

2.3 回归分析

广义可加模型(GAM)是一种拟合非参数函数来估计响应变量与解释变量之间关系的模型,是广义线性模型(GLM)的进一步推广,优点是拟合曲线能最大限度的符合原始数据^[16]。前人已经运用该模型对贺兰山木本植物物种多样性的海拔格局^[17]、伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局^[18]环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响^[19]等进行了研究,并得出了较好的结果。其一般形式为:

$$g(E(Y)) = \alpha + X^T\beta$$

式中, α 、 β 分别相当于线性回归模型中的截距和回归系数矩阵, X^T 表示预测变量矩阵, $E(Y)$ 为响应变量 Y 的期望, $g(\cdot)$ 表示联结函数,而 $S(\cdot)$ 表示平滑函数。GAM 分析在 CANOCO 软件(Version 4.5)中完成。

GAM 预测模型拟合结果的评价指标为模型的偏差(D^2),其计算公式如下:

$$D^2 = (\text{无效偏差} - \text{剩余偏差}) / \text{无效偏差}$$

式中, D^2 相当于线性回归模型中的回归系数 R^2 ,反映了模型可解释的偏差。而无效偏差是指模型在只剩截距时的偏差,剩余偏差指拟合状态下仍然不能解释的偏差。理想状况下的 D^2 值应当为 1,表明没有剩余偏差,模型完全解释^[20]。

3 结果分析

3.1 群落特征概况

采用重要值作为各物种在群落中的优势度指标,以表达不同物种在群落中的功能地位,以及反映其在群落中的分布格局状况。乔木层是森林生态系统的主要成分,其组成成分决定了林下的灌木层和草本层的组成和结构^[7],因而首先选用乔木的重要值进行分类。对研究区森林生态系统组成种重要值排序(表 1)分析发现五鹿山自然保护区内建群种主要是刺槐、油松、白皮松、辽东栎等;灌木层主要优势种为黄刺玫、水栒子、陕西荚蒾等;草本层主要优势种为披针叶苔草、铁杆蒿、淫羊藿等。

五鹿山自然保护区内沿海拔升高,受水热组合的变化,地带性植被发生着有序的变化(表 2)。群落内的建群种和优势种也发生着有序的变化,大体上,从低海拔到高海拔依次为刺槐、白皮松、油松、茶条槭、华北落叶松、辽东栎,其中白皮松、辽东栎和油松的生态幅较宽、分布范围较广,刺槐、茶条槭、华北落叶松等只在一些小生境中成为优势种或建群种。灌木层中主要优势种为黄刺玫、陕西荚蒾、水栒子;草本层,除在较低海拔下优势种为铁杆蒿,其余海拔下优势种均为披针叶苔草。

运用 GAM 模型拟合乔木的胸高截面积沿海拔的分布格局(图 2),可看出乔木的胸高截面积沿海拔梯度大体呈递增的变化趋势。因为从低海拔到高海拔群落类型逐渐由针叶林向辽东栎林过渡特别是进入辽东栎林以后(从海拔 1610m 开始)乔木的胸高截面积随海拔升高急剧增大,而低海拔(<1110m)群落类型为刺槐疏林,林冠郁闭度较小。

3.2 α 多样性变化

区内 α 多样性随海拔梯度变化如图 3 从图中可看出不同层次的物种丰富度对环境变化的敏感程度不同。

物种丰富度

(1) 乔木层,总体上中海拔区域物种丰富度高,低海拔、高海拔区物种丰富度较低。其中海拔 1260—1480 m 的几个样地最高,这是因为该区域的群落类型为辽东栎+白皮松混交林和茶条槭+油松混交林,乔木层物种比较丰富,含有较多的亚优势种和伴生种,如:油松、白桦、华北落叶松。

表 1 五鹿山自然保护区不同群落类型主要优势种重要值排序

Table 1 Importance values of the dominant species of wulu Mountain Nature Reserve

群落类型 Community	乔木层 Tree layer		灌木层 Shurb layer		草本层 Herb layer	
	物种名 Speices	重要值 Important value	物种名 Speices	重要值 Important value	物种名 Speices	重要值 Important value
刺槐林 <i>Robinia pseudoa</i> <i>cacia</i> forest	刺槐	3	刺槐幼树	0.775	铁杆蒿	0.430
	<i>Robinia pseudo cacia</i>		<i>Robinia pseudo Cacia saplings</i>		<i>Artemisia gmelinii</i>	
			黄刺玫	0.604	披针叶苔草	0.265
			<i>Rosa xanthina</i>		<i>Carex lanceolata</i>	
			荆条	0.363	猪毛蒿	0.190
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	白皮松	1.360	陕西荚蒾	0.275	披针叶苔草	0.685
	<i>Pinus bungeana</i>		<i>Viburnum schensianum</i>		<i>Carex lanceolata</i>	
	侧柏	0.717	黄刺玫	0.245	荩草	0.082
	<i>Platyclus orientalis</i>		<i>Rosa xanthina</i>		<i>Arthraxon hispidus</i>	
	油松	0.540	虎榛子	0.208	黄精	0.058
针阔混交林 Mixed forest	<i>Pinus tabuliformis</i>		<i>Ostryopsis davidiana</i>		<i>Polygonatum sibiricum</i>	
	油松	0.722	水栒子	0.350	披针叶苔草	0.515
	<i>Pinus tabuliformis</i>		<i>Cotoneaster multiflora</i>		<i>Carex lanceolata</i>	
	茶条槭	0.321	黄刺玫	0.312	山马兰	0.112
	<i>Acer ginnala</i>		<i>Rosa xanthina</i>		<i>Kalimeris lautureana</i>	
辽东栎林 <i>Quercus liaotungensis</i> forest	辽东栎	0.308	陕西荚蒾	0.262	淫羊藿	0.055
	<i>Quercus liaotungensis</i>		<i>Viburnum schensianum</i>		<i>Epimedium brevicornu Maxim</i>	
	辽东栎	1.934	黄刺玫	0.268	披针叶苔草	0.423
	<i>Quercus liaotungensis</i>		<i>Rosa xanthina</i>		<i>Carex lanceolata</i>	
	杜梨	0.143	水栒子	0.172	淫羊藿	0.126
	<i>Pyrus betulifolia</i>		<i>Cotoneaster multiflora</i>		<i>Epimedium brevicornu Maxim</i>	
	暴马丁香	0.123	三裂绣线菊	0.165	山马兰 V0.099	
	<i>Syringa reticulata var. amurensis</i>		<i>Spiraea trilobata</i>		<i>Kalimeris lautureana</i>	

乔木层重要值计算公式为:重要值=相对多度(RA)+相对显著度(RD)+相对频度(RF);灌木层和草本层的计算公式为:重要值=相对高度(RH)+相对盖度(RC)+相对频度(RF);具体计算公式如下: $IV = RA(RH) + RD(RC) + RF = \frac{N_i}{N} + \frac{X_i}{X} + \frac{F_i}{F}$,式中 N_i :第*i*个物种个体数(高度和), N :个体总数(高度总和); X_i :第*i*个物种胸高截面积和(盖度和), X :所有物种总胸高截面积(盖度和); F_i :第*i*个物种出现的频率, F :所有物种的频率和,第*i*个物种出现的频率=第*i*个物种出现的样方数/所有样方数

表 2 沿海拔梯度主要群落类型及主要组成种

Table 2 Both community type & community composition vary along the altitudinal gradient

海拔高度 Altitude/m	主要群落类型 Main community type	主要组成种 Main composition
<1110	刺槐林 <i>Robinia pseudo cacia</i> forest	刺槐-刺槐幼树+黄刺玫-铁杆蒿 <i>Robinia pseudo cacia</i> - <i>Robinia pseudo cacia saplings</i> + <i>Rosa xanthina</i> - <i>Artemisia gmelinii</i>
1110—1260	白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	白皮松-陕西荚蒾+黄刺玫-披针叶苔草 <i>Pinus bungeana</i> - <i>Viburnum schensianum</i> + <i>Rosa xanthina</i> - <i>Carex lanceolata</i>
1260—1440	辽东栎+白皮松混交林 <i>Quercus wutaishanica</i> + <i>Pinus bungeana</i> forest	辽东栎+白皮松-陕西荚蒾-披针叶苔草 <i>Quercus wutaishanica</i> + <i>Pinus bungeana</i> - <i>Viburnum schensianum</i> - <i>Carex lanceolata</i>
1440—1480	茶条槭+油松混交林 <i>Acer ginnala</i> + <i>Pinus tabuliformis</i> forest	茶条槭+油松-黄刺玫-披针叶苔草 <i>Acer ginnala</i> + <i>Pinus tabuliformis</i> - <i>Rosa xanthina</i> - <i>Carex lanceolata</i>
1480—1610	油松+辽东栎+华北落叶松混交林 <i>Pinus tabuliformis</i> + <i>Quercus wutaishanica</i> + <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest	油松+辽东栎+华北落叶松-水栒子-披针叶苔草 <i>Pinus tabuliformis</i> + <i>Quercus wutaishanica</i> + <i>Larix principis</i> - <i>Cotoneaster multiflora</i> - <i>Carex lanceolata</i>
1610—1877	辽东栎林 <i>Quercus wutaishanica</i> forest	辽东栎-黄刺玫+水栒子-披针叶苔草 <i>Quercus wutaishanica</i> - <i>Rosa xanthina</i> + <i>Cotoneaster multiflora</i> - <i>Carex lanceolata</i>

(2) 灌木层,除海拔 1160 和 1260 m 处由于受小生境(沟谷空气湿润、土壤肥沃)的影响物种丰富度指数较高分别为 19、20 外,其余海拔下物种丰富度大体呈以中高海拔 1507 m 处为峰值的偏峰分布格局,是因为该处的水热组合较好,且乔木层物种丰富度较低($D=3$),为灌木层物种的发育提供了良好的光环境。

(3) 草本层,在海拔在海拔 1040—1400 m 之间之间草本层的物种丰富度随海拔升高逐渐下降,大于海拔 1400m 时,丰富度指数变化不大。这是因为,乔木层的胸高截面积随海拔的升高呈递增的趋势(图 1)而草本层的物种丰富度与乔木层的胸高截面积呈明显的负相关关系(图 4)。即林木对地面的遮蔽越严重,草本层的物种丰富度就越低^[8,21]。到海拔 1400m 以后除了受乔木层的胸高截面积的影响外还受水热组合、自然选择等多方面因素的影响,变化趋势变得明显。

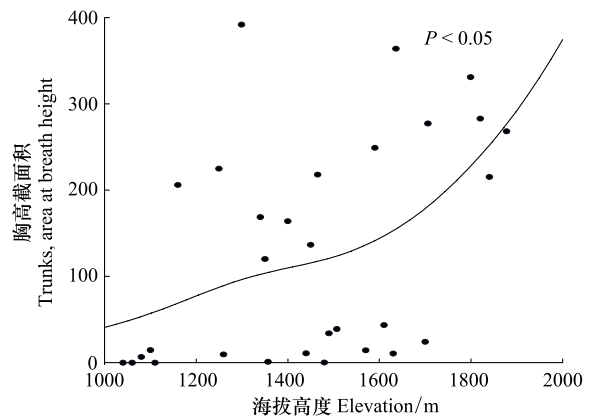


图 2 森林群落乔木胸高截面积沿海拔梯度的变化

Fig. 2 Changes of total Trunks, area at breath height in all forest plots along altitude

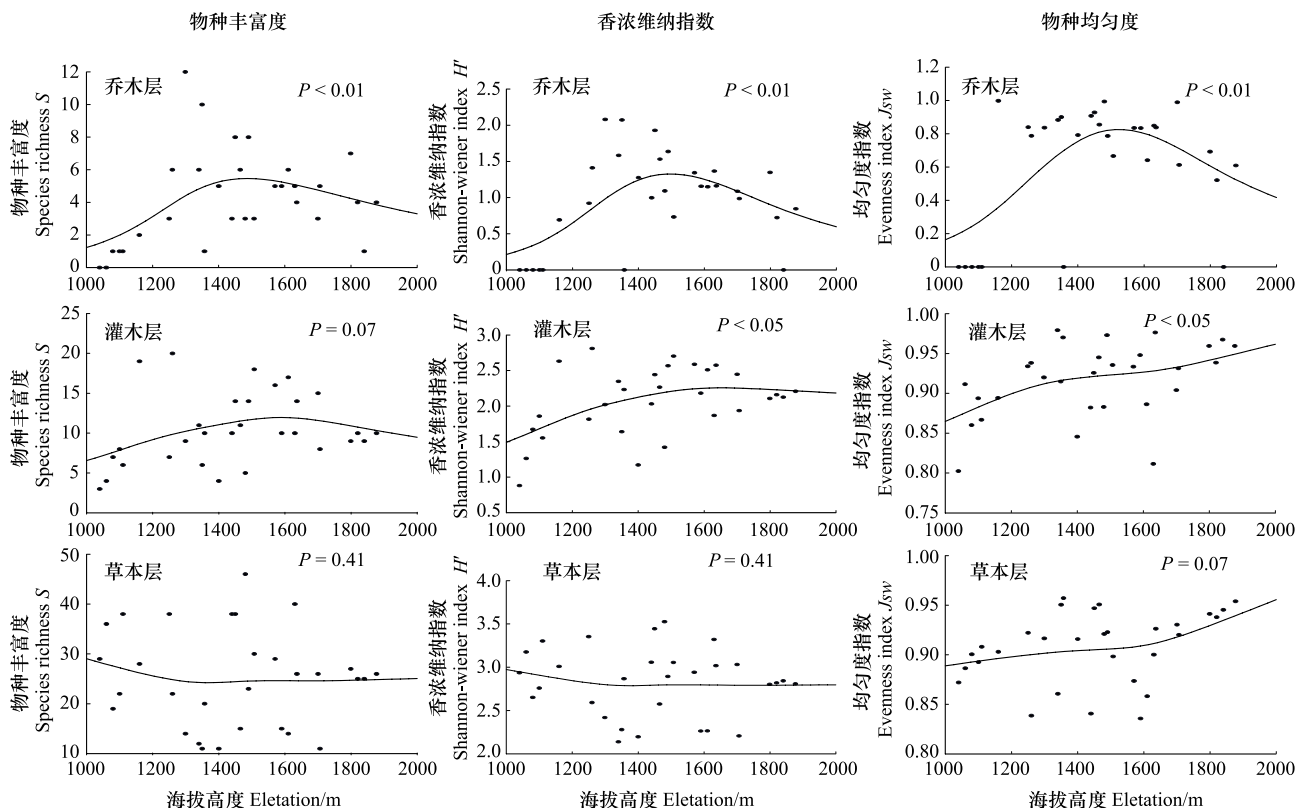


图 3 五鹿山自然保护区多样性海拔梯度的变化

Fig. 3 Variation of α -diversity along altitudinal gradient of wulu Mountain nature reserve

Shannon-Wiener 多样性指数: Shannon-Wiener 多样性指数与物种丰富度变化趋势大体相同。

物种均匀度:

乔木层的均匀度指数变化趋势与其丰富度指数、香浓维纳指数的变化趋势相同,呈显著的单峰分布格局($P < 0.01$),这是因为中海拔群落类型为针阔混交林,物种丰富,优势种作用不明显。灌、草层随海拔升高常见种与稀少种的差距减小,均匀度指数大体呈递增的趋势。

3.3 草本物种丰富度与乔木胸高截面积的关系

以不同海拔乔木的胸高截面积为横坐标,以草本的物种丰富度为纵坐标作图(图 6)结果表明,随着乔木胸高截面积的增大,草本的物种丰富度大体呈递减趋势,即草本的物种丰富度与乔木胸高截面积呈负相关关系。样方内乔木的胸高截面积越大,林冠郁闭度也越大^[22]。林冠郁闭度通过光照、局部温湿度、紫外线强度等方面的差异对林下物种尤其是草本层的分布产生明显影响^[23]。

3.4 β 多样性

五鹿山自然保护区 β 多样性(图 5)沿海拔梯度大体呈“~”型变化。较低海拔和山顶附近的物种更替速率较快,较低海拔白皮松林向针阔混交林过渡带物种变化速率较快,β 多样性出现一个峰值,较高海拔(>1750 m)由于水热组合的影响,适生物种的种类发生变化,同时数量急剧减少(例如:油松主要分布在海拔 1200—1700 m 的地方,槭、椴树分布的最高海拔为 1750 m^[11])物种变化速率较快,β 多样性较大。其余海拔下变化比较平缓。

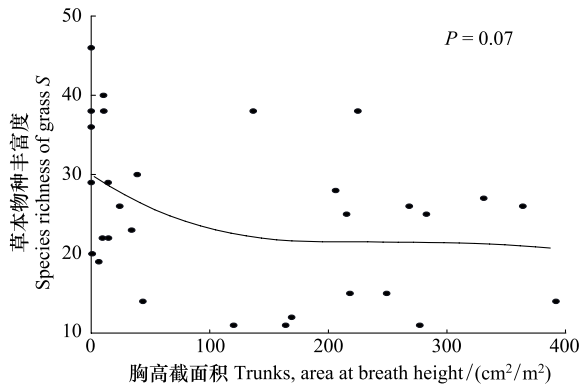


图 4 草本物种丰富度与乔木胸高截面积的关系

Fig. 4 The relationships of species richnesses of grass and total Trunks, area at breath height in all forest plots

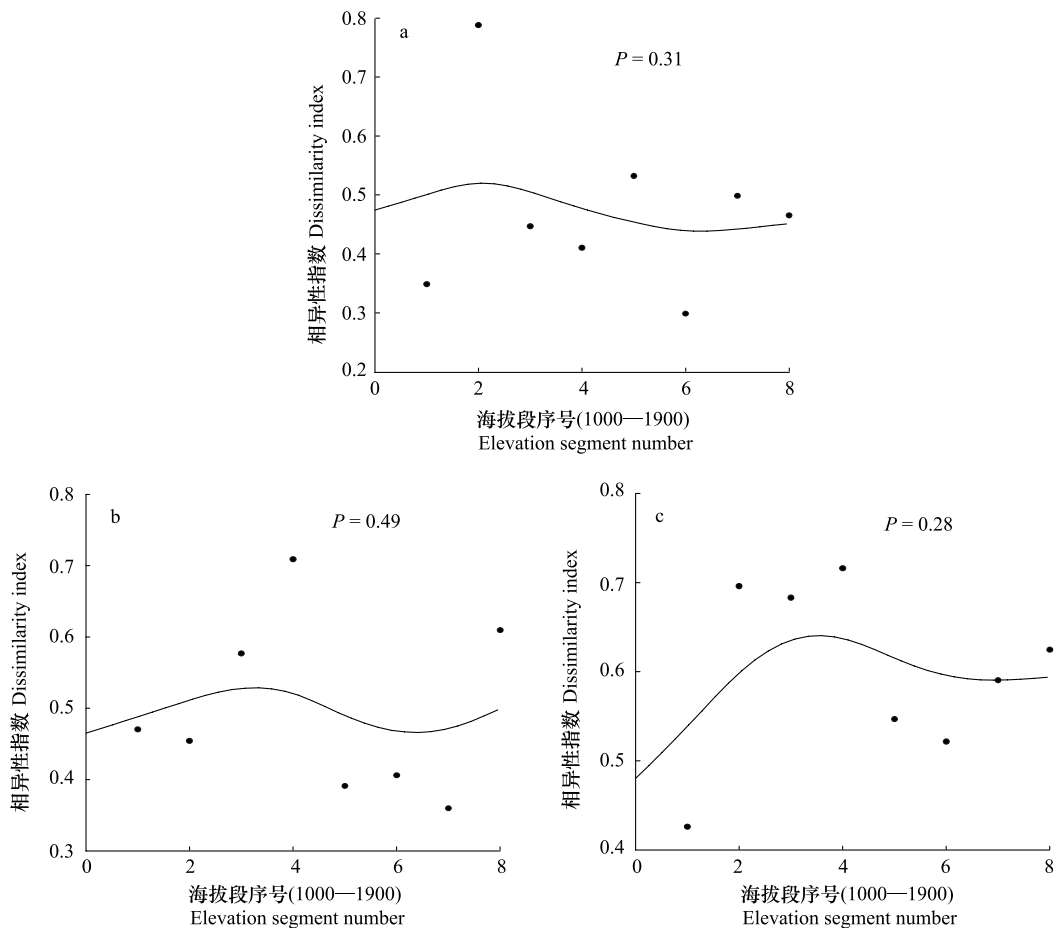


图 5 五鹿山自然保护区群落间物种相异性(β-多样性)沿海拔梯度的变化

Fig. 5 variation of β- diversity along the altitudinal gradient of Wulu Mountain narure reserve

3.5 γ 多样性

文中将五鹿山自然保护区按海拔 100m 为区间分段,以各海拔段内出现的物种数为纵坐标作图,具体结果如图 6 所示,五鹿山自然保护区物种丰富度沿海拔梯度大体呈单峰分布格局,在中高海拔 1400—1500m 之间出现最大值。较低海拔区,人为干扰较大,降水量较少,土壤贫瘠,适合生存的物种少,随着海拔升高,降水量增加,同时气温降低,地表蒸发量减少,土壤中有机物质的含量增加,适合生存的物种增多,物种丰富度逐渐达到峰值,到高海拔区域,气候寒冷,同时生长季较少的降水量也限制了植物的生存,物种丰富度逐渐降低。

3.6 海拔与物种分布相关性分析

GAM 拟合模型中 D^2 相当于相关系数 R^2 ,反映了模型可解释的偏差。从表 3 可看出海拔与不同层次的各项多样性指数的相关程度不一,其中与乔、灌层的 α 多样性的相关性程度较大, D^2 介于 18.2% 到 63.2% 之间,而与草本层的 α 多样性的相关性程度较小, D^2 介于 3.8% 到 17% 之间,这是因为,除海拔外,乔木层的胸高截面积也对草本层的物种分布产生一定的影响($D^2 = 17.9\%$);与乔、灌、草 β 多样性的相关系数分别为 14.7%、24.7%、39.4%;与总物种 γ 多样性的相关系数为 38.8%。

4 结论和讨论

4.1 讨论

α 多样性具有多种环境梯度(海拔梯度、纬度梯度等)格局,其中海拔梯度是环境梯度中的主导梯度之一^[24-28]。物种多样性沿海拔梯度的分布格局一般有 5 种形式,分别是随海拔升高先降低后升高、先升高后降低(单峰曲线)、单调升高、单调下降和没有明显格局^[8-9]且不同生活型的植物种类沿海拔梯度呈现不同的多样性格局^[29]。

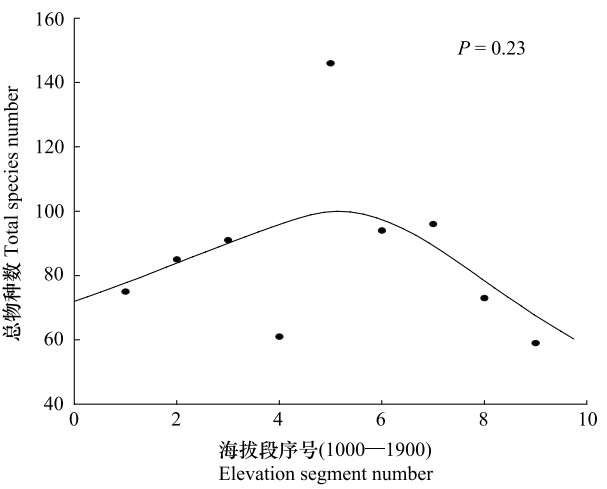


图 6 五鹿山自然保护区总物种丰富度(γ 多样性)沿海拔梯度的变化

Fig.6 Variation of γ-diversity along the altitudinal gradient of Wulu Mounition nature reserve

表 3 GAM 预测模型的偏差表
Table3 D^2 value of GAM model

自变量 Independent variable	响应变量 Predicted variable		无效偏差 Null deviance	剩余偏差 Residual deviance	偏差 D^2
海拔 Elev	乔木层胸高截面积	TTR	4293.88	3357.3	0.218
海拔 Elev	乔木层丰富度指数	D_1	63.54	39.27	0.382
海拔 Elev	灌木层丰富度指数	D_2	58.44	47.79	0.182
海拔 Elev	草本层丰富度指数	D_3	114.66	110.28	0.038
海拔 Elev	乔木层香浓维纳指数	H'_1	18.23	10.5	0.424
海拔 Elev	灌木层香浓维纳指数	H'_2	3.54	2.58	0.271
海拔 Elev	草本层香浓维纳指数	H'_3	1.7	1.59	0.065
海拔 Elev	乔木层均匀度指数	J'_1	10.36	6.47	0.375
海拔 Elev	灌木层均匀度指数	J'_2	0.052	0.019	0.632
海拔 Elev	草本层均匀度纳指数	J'_3	0.042	0.035	0.170
海拔 Elev	乔木层 β 多样性	β_1	0.302	0.258	0.147
海拔 Elev	灌木层 β 多样性	β_2	0.205	0.154	0.247
海拔 Elev	草本层 β 多样性	β_3	0.120	0.072	0.394
海拔 Elev	γ 多样性	γ	57.81	35.4	0.388
乔木层胸高截面积 TTR	草本层物种丰富度	D_3	114.66	94.19	0.179

五鹿山自然保护区 α 多样性受群落类型更替的影响,沿海拔梯度变化发生一定的波动。且乔灌草 3 层的变化规律及敏感程度都不同。物种丰富度指数在多数海拔下为草本层 > 灌木层 > 乔木层,在低海拔区,人类活动影响较大、降水量少、土壤贫瘠^[11] 乔灌层物种组成单一,群落类型为纯林(刺槐林、白皮松林),物种丰富度较低,随着海拔的升高,人类活动减少,水热组合发生变化,地带性植被发生更替,建群种和伴生种也发生变化,形成针阔混交林,乔灌层的物种丰富度升高,到一定海拔,温度降低到只适合部分物种生长时,地带性植被由混交林逐渐变为纯林(辽东栎林),乔灌层丰富度又开始降低,只有在中间海拔时人为干扰较小,且水热组合最佳,乔灌层丰富度最高。草本层的物种丰富度在较低海拔下,由于受乔木层郁闭度的影响,随海拔升高,物种丰富度逐渐减低,到海拔 1400m 以后由于受乔木层的郁闭度、水热组合、自然选择等多方面因素的综合影响,变化趋势逐渐变得不明显。

Shannon-Wiener 指数与丰富度指数变化趋势大体相同,与相关研究^[28,30] 结论相同。

乔木层的均匀度指数与其丰富度指数、香浓维纳指数的变化趋势大体相同也呈单峰分布格局,这是因为中间海拔的水热组合适宜、干扰较小为乔木层创造了有利的生存条件,优势种的作用不明显,均匀度较高。灌木层和草本层的均匀度指数,随海拔升高逐渐变大,这是因为,均匀度指数除与丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数有一定的相关性之外,还与个体数目或生物量等指标在各个物种中分布的均匀程度有关^[30]。研究区随海拔升高,灌草层中常见种与稀少种的差距逐渐减小,群落向着均方向发展,所以随海拔升高,均匀度指数逐渐增大,这与实际调查时研究区现状相符。

β 多样性反映了生境间的多样性,控制 β 多样性的主要生态因子有水分、土壤、地貌及干扰等^[14],它可以反映较大距离上群落组成的差异^[31-33],也可以是小范围内环境梯度快速变化下物种组成的更替^[6,34]。在对 β 多样性随海拔梯度变化格局的研究中,不同学者也得出了不同结论。大致可分为 3 种:(1) β 多样性性沿海拔梯度的无规律变化, β 多样性的高值一般出现在群落的交错带^[35];(2) 植物的 β 多样性随海拔升高而单调下降^[35];(3) 在低海拔变化不大,而在高海拔地区随着海拔升高急剧上升^[36]。本研究中用 Sørensen 指数反映 β 多样性,该指数可以很好地反映研究区内群落物种组成沿海拔梯度发生的变化,群落间 Sørensen 指数沿海拔梯度峰值出现的区域为建群种发生更替的过渡带,即不同群落类型的交错带^[37]。研究发现五鹿山自然保护区 β 多样性沿海拔梯度大体呈“~”型变化,较低海拔白皮松林向针阔混交林过渡带物种变化速率较快, β 多样性出现一个峰值,较高海拔由于水热组合的影响,适生物种的种类发生变化,同时数量急剧减少物种变化速率较快, β 多样性较大。

γ 多样性随海拔梯度呈现两种较为普遍的分布格局:1) 偏峰分布格局(不同研究中峰值出现的区域不同);2) 线性递减的负相关格局^[25]。五鹿山自然保护区 γ 多样性的峰值出现在中海拔地区。这是因为,低海拔的干旱、人为干扰和高海拔的严寒限制了物种的生长^[11] 中间海拔区域温度和降水量配置适宜,环境和资源条件优越,形成了物种多样性的峰值区域^[17,25,38]。这与 Abrams 提出的单峰关系学说比较相似,在生产力较低时,多样性随生产力的增加而增加,但当生产力达到足够高时多样性会下降,亦即在群落生产力达到中等水平时出现最高的多样性^[39]。

运用 GAM 模型拟合各多样性指数与海拔之间的相关关系,除草本层的 α 多样性由于受乔木层郁闭度影响与海拔拟合模型的偏差较小,其余模型的偏差介于 17%—63.2% 之间,说明海拔是影响物种分布的重要因素。但拟合模型的偏差均小于 1 表明除海拔外还有其他的因素影响物种的分布,例如在较小的海拔范围内地形因子可能会对物种分布产生一定的影响^[18] 这有待进一步的研究。

4.2 结论

在自然因素和人为因素共同作用下,五鹿山自然保护区乔、灌、草及总物种的多样性随海拔梯度发生一定的变化,中间海拔人为干扰较小,同时水热资源配置良好,导致乔、灌层及总物种多样性在中间海拔出现峰值,而草本层在水热组合、人为干扰和乔木层郁闭度的共同影响下多样性指数呈现随海拔升高递减的趋势。

调查中发现:五鹿山中海拔地段(1400—1500 m)生物多样性较高,白皮松在黑虎沟海拔 1110—1260 m 地

段生长良好,辽东栎从海拔 1260m 到山顶都有分布,其中海拔 1610m 以上几乎为纯林,在瓦罐庙、红军寨等地分布典型。白皮松是我国特有树种,分布面积非常狭小,辽东栎是五鹿山的地带性植被,是中国落叶阔叶林的典型群落,也是褐马鸡的重要栖息地^[11]。因此建议不同海拔段采取不同的保护措施,以取得较好的效果。

致谢:感谢北京师范大学 Lamber Nyobe 博士对英文摘要的润色。

References:

- [1] Zhao Z Y, Wang R H, Yin C H, Zhang H Z, Wang L. Species diversity and spatial heterogeneity of plant communities in piedmont plain of South Slope of Tianshan Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(4): 784-790.
- [2] Wang G H, Zhou G S, Yang L M, Li Z Q. 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*, 2002, 165(2): 169-181.
- [3] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-226.
- [4] Walter H. *Vegetation of the Earth*. 2nd ed. New York: Springer, 1979: 1-35.
- [5] Deng H B, Hao Z Q, Wang Q L. The changes of co-possession of plant species between communities with altitudes on northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(2): 89-92.
- [6] Liu Z L, Zheng C Y, Fang J Y. Changes in plant species diversity along an elevation gradient on Mt. Xiao Wutai, Hebei, China. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 137-145.
- [7] Zhao S Q, Fang J Y, Zong Z J, Zhu B, Shen H H. Composition, structure and species diversity of plant communities along an altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai, Northeast China. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 164-173.
- [8] He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 91-99.
- [9] Liu X L, Shi Z M, Yang D S, Liu S R, Yang Y P, Ma Q Y. Advances in study on changes of biodiversity and productivity along elevational gradient in mountainous plant community. *World Forestry Research*, 2005, 18(4): 27-34.
- [10] Zhang X L, Jing S H. Biodiversity research and development measures for Five-deer Mountain nature reserve. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(7): 696-698.
- [11] Bi R C, Wei X Z, Duan Z S, Yu W L, Cui B Y. *Scientific Investigating Report for Nature Reserves in Wulu Mountain of Shanxi*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2004: 1-249.
- [12] Mao F F, Xu B S. The main vegetation types and their distribution in the Wu Lu Mountainous region. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 1988, 2(1): 61-67.
- [13] Wei X Z, Su J X, Liu W Z, Wang Y Y, Zhang L P, Bi R C, Li X F, Huang L, Li J F, Cui B Y. A List of the Plants in the Wulushan. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2003, 17(3): 72-79.
- [14] Cui B S, Zhao X S, Yang Z F, Tang N, Tan X J. The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1533-1541.
- [15] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [16] Shen Z H, Zhao J. Prediction of the spatial patterns of species richness based on the plant topography relationship: an application of GAMs approach. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 953-963.
- [17] Zhu Y, Kang M Y, Jiang Y, Liu Q R. Altitudinal pattern of species diversity in woody plant communities of mountain Helan, northwestern China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 574-581.
- [18] Xu Y J, Chen Y N, Li W H, Fu A H, Ma X D, Gui D W, Chen Y P. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1142-1154.
- [19] Ren X M, Yang G H, Wang D X, Qin X W, Liu Z X, Zhao S X, Bai Y. Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an *Abies fargesii*-*Betula utilis* mixed forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 605-613.
- [20] Wang S P, Zhang Z Q, Zhang J J, Zhu J Z, Guo J T, Tang Y. modeling the effects of topography on the spatial distribution of secondary species in a small watershed in the Gully region on the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6102-6112.
- [21] Xie J Y, Chen L Z. Species diversity characteristics of deciduous forests in the warm temperate zone of north china. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4): 337-344.
- [22] Zhu Y, Kang M Y, Liu Q R, Su Y, Jiang Y. Comparison of forest structure and floristic composition of coniferous forest in Helan Mountain. *Geographical Research*, 2007, 26(2): 305-313.
- [23] Fang J Y. Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 1-4.
- [24] Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 224-239.
- [25] Tang Z Y, Fang J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 20-28.
- [26] Hao Z Q, Yu D Y, Yang X M, Ding Z H. α diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 786-789.
- [27] Dolezal J, Srutek M. Altitudinal changes in composition and structure of mountain-temperate vegetation: a case study from the Western Carpathians. *Plant Ecology*, 2002, 158(2): 202-221.
- [28] Chen J, Guo Y L, Lu X L, Ding S Y, Su S, Guo J J, Li Q X. Species diversity of herbaceous communities in the Yiluo River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3021-3030.

- [29] Ojeda F, Marañón T, Arroyo J. Plant diversity patterns in the Aljibe Mountains (S. Spain): a comprehensive account. *Biodiversity and Conservation*, 2000, 9(9): 1323-1343.
- [30] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277.
- [31] Condit R, Pitman N, Leigh E G Jr, Chave J, Terborgh J, Foster R B, Núñez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau H C, Losos E, Hubbell S P. Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, 2002, 295(5555): 666-669.
- [32] Normand S, Vormisto J, Svenning J C, Grández C, Balslev H. Geographical and environmental controls of palm beta diversity in paleo-riverine terrace forests in Amazonian Peru. *Plant Ecology*, 2006, 186(2): 161-176.
- [33] Bridgewater S, Ratter J A, Ribeiro J F. Biogeographic patterns, β -diversity and dominance in the Cerrado biome of Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13(12): 2295-2318.
- [34] Hao Z Q, Yu D Y, Wu G, Deng H B, Jiang P, Wang Q L. Analysis on β diversity of plant communities on northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2018-2022.
- [35] Vázquez G J A, Givnish T J. Altitudinal gradients in tropical forest composition, structure, and diversity in the Sierra de Manantlan. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 999-1020.
- [36] Odland A, Birks H J B. The altitudinal gradient of vascular plant richness in Aurland, western Norway. *Ecography*, 1999, 22(5): 548-566.
- [37] Lu X L, Hu N, Ding S Y, Fan Y L, Liao B H, Zhai Y J, Liu J. The pattern of plant species diversity of Funiu Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5790-5798.
- [38] Whittaker R J, Willis K J, Field R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 2001, 28(4): 453-470.
- [39] Abrams P A. Monotonic or unimodal diversity-productivity gradients: what does competition theory predict? *Ecology*, 1995, 76(7): 2019-2027.

参考文献:

- [1] 赵振勇, 王让会, 尹传华, 张慧芝, 王雷. 天山南麓山前平原植物群落物种多样性及空间分异研究. *西北植物学报*, 2007, 27(4): 784-790.
- [6] 刘增力, 郑成洋, 方精云. 河北小五台山东坡植物物种多样性的垂直梯度变化. *生物多样性*, 2004, 12(1): 137-145.
- [7] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 朱彪, 沈海花. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布. *生物多样性*, 2004, 12(1): 164-173.
- [8] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 1997, 17(1): 91-99.
- [9] 刘兴良, 史作民, 杨冬生, 刘世荣, 杨玉坡, 马钦彦. 山地植物群落生物多样性与生物生产力海拔梯度变化研究进展. *世界林业研究*, 2005, 18(4): 27-34.
- [10] 张晓玲, 景慎好. 五鹿山国家级自然保护区生物多样性研究与发展对策. *山西农业科学*, 2011, 39(7): 696-698.
- [11] 毕润成, 魏学智, 段长锁, 尉文龙, 崔本义. 山西省五鹿山自然保护区科学考察报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 1-249.
- [12] 毛芬芳, 徐宝珊. 五鹿山地区主要植被类型和分布. *山西师大学报: 自然科学版*, 1988, 2(1): 61-67.
- [13] 魏学智, 苏俊霞, 刘维仲, 王玉燕, 张丽萍, 毕润成, 李晓峰, 黄磊, 李俊峰, 崔本一. 五鹿山种子植物名录. *山西师大学报: 自然科学版*, 2003, 17(3): 72-79.
- [14] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 唐娜, 谭学界. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应. *生态学报*, 2006, 26(5): 1533-1541.
- [16] 沈泽昊, 赵俊. 基于植物-地形关系的物种丰富度空间格局预测——GAMs 途径的一种应用. *生态学报*, 2007, 27(3): 953-963.
- [17] 朱源, 康慕谊, 江源, 刘全儒. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 574-581.
- [18] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏. 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*, 2010, 34(10): 1142-1154.
- [19] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 秦晓威, 刘振学, 赵双喜, 白宇. 环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 605-613.
- [20] 王盛平, 张志强, 张建军, 朱金兆, 郭军庭, 唐寅. 黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应. *生态学报*, 2010, 30(22): 6102-6112.
- [21] 谢晋阳, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征. *生态学报*, 1994, 14(4): 337-344.
- [22] 朱源, 康慕谊, 刘全儒, 苏云, 江源. 贺兰山针叶林结构特征与种类组成的比较. *地理研究*, 2007, 26(2): 305-313.
- [23] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律. *生物多样性*, 2004, 12(1): 1-4.
- [25] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 2004, 12(1): 20-28.
- [26] 郝占庆, 于德永, 杨晓明, 丁之慧. 长白山北坡植物群落 α 多样性及其随海拔梯度的变化. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 785-789.
- [28] 陈杰, 郭屹立, 卢训令, 丁圣彦, 苏思, 郭静静, 李乾玺. 伊洛河流域草本植物群落物种多样性. *生态学报*, 2012, 32(10): 3021-3030.
- [30] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [34] 郝占庆, 于德永, 吴钢, 邓红兵, 姜萍, 王庆礼. 长白山北坡植物群落 β 多样性分析. *生态学报*, 2001, 21(12): 2018-2022.
- [37] 卢训令, 胡楠, 丁圣彦, 范玉龙, 廖秉华, 翟元杰, 柳静. 伏牛山自然保护区物种多样性分布格局. *生态学报*, 2010, 30(21): 5790-5798.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 8 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Urban Ecosystems

- Guidelines and evaluation indicators of urban ecological landscape construction SUN Ranhao, CHEN Ailian, LI Fen, et al (2322)
- Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, et al (2330)
- Effects of land use change on ecosystem service value: a case study in Huaibei City, China ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (2343)
- Urban ecosystem complexity: an analysis based on urban municipal supervision and management information system DONG Rencai, GOU Yaqing, LIU Xin (2350)
- A case study of the effects of *in-situ* bioremediation on the release of pollutants from contaminated sediments in a typical, polluted urban river LIU Min, WANG Rusong, JIANG Ying, et al (2358)
- The pollution characteristics of Beijing urban road sediments REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2365)
- Effects of urban green pattern on urban surface thermal environment CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (2372)
- Seasonal dynamics of airborne pollen in Beijing Urban Area MENG Ling, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2381)

Autecology & Fundamentals

- Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers XU Cui, ZHANG Linbo, DU Jiaqiang, et al (2388)
- Predicting the plant exposure to soil arsenic under varying soil factors XIAN Yu, WANG Meie, CHEN Weiping (2400)
- Attraction effect of different host-plant to Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* LI Chao, CHENG Dengfa, GUO Wenchao, et al (2410)
- Root decomposition and nutrient dynamics of *Quercus mongolica* and *Betula Platyphylla* JIN Beibei, GUO Qingxi (2416)
- The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* WANG Lin, FENG Jinxia, WANG Shuangxia, et al (2425)
- Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese Fir under different canopy density conditions FU Liyong, SUN Hua, ZHANG Huiru, et al (2434)
- Effects of temperature acclimation and acute thermal change on cutaneous respiration in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) XIAN Xuemei, CAO Zhendong, FU Shijian (2444)

Population, Community and Ecosystem

- Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China HE Yanhua, YAN Ming, ZHANG Qindi, et al (2452)
- Vegetation succession on Baishui No. 1 glacier foreland, Mt. Yulong CHANG Li, HE Yuanqing, YANG Taibao, et al (2463)
- The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution WANG Gang, YANG Wenbin, WANG Guoxiang, et al (2474)
- Community characteristics and soil properties of coniferous plantation forest monocultures in the early stages after close-to-nature transformation management in southern subtropical China HE Youjun, LIANG Xingyun, QIN Lin, et al (2484)
- Response of invasive plant *Flaveria bidentis* to simulated herbivory based on the growth and reproduction WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, LI Yujin, et al (2496)
- Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxing'an Mountains LIU Zhili, JIN Guangze (2505)
- Optimal number of herb vegetation clusters: a case study on Yellow River Delta YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (2514)
- Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay ZHANG Ying, LI Shaowen, LÜ Zhenbo, et al (2522)
- Soil meso-and micro arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages YANG Daxing, YANG Maofa, XU Jin, et al (2531)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance ZHANG Jie, ZHANG Qiang, TANG Congguo (2545)
- Analysis and forecast of landscape pattern in Xi'an from 2000 to 2011 ZHAO Yonghua, JIA Xia, LIU Jianchao, et al (2556)
- Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (2565)

Resource and Industrial Ecology

- Household optimal forest management decision and carbon supply: case from Zhejiang and Jiangxi Provinces ZHU Zhen, SHEN Yueqin, WU Weiguang, et al (2577)
- Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al (2586)
- Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application MA Xueyan, ZHOU Guangsheng (2596)

Urban, Rural and Social Ecology

- Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou Municipality LIU Lu, GUAN Dongsheng, CHEN Yongqin David (2604)

Research Notes

- Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum* LIU Zigang, SHEN Bing, ZHANG Yan (2615)
- Effects of nutrients on the growth of the parasitic plant *Cuscuta australis* R. Br. ZHANG Jing, LI Junmin, YAN Ming (2623)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吕永龙

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 8 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 8 (April, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元