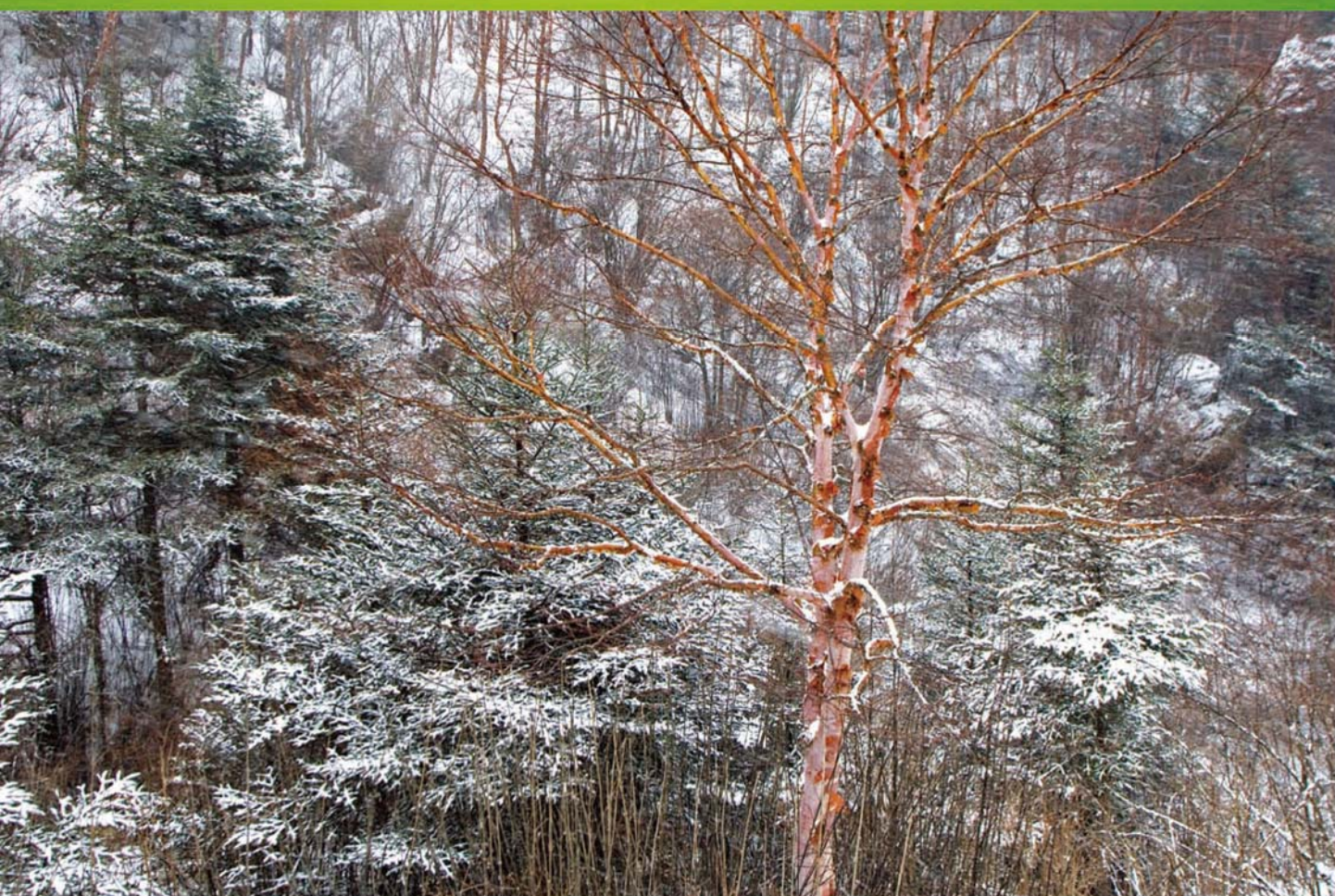


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

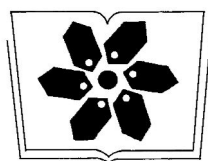
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **2014**

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 34 卷 第 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

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/stxb201308162093

陈云,王海亮,韩军旺,韦博良,贾宏汝,叶永忠,袁志良.小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局.生态学报,2014,34(8):2068-2075.

Chen Y, Wang H L, Han J W, Wei B L, Jia H R, Ye Y Z, Yuan Z L. Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqinling. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2068-2075.

小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局

陈 云¹, 王海亮², 韩军旺², 韦博良¹, 贾宏汝³, 叶永忠¹, 袁志良^{1,*}

(1. 河南农业大学 生命科学院, 郑州 450002; 2. 河南小秦岭国家级自然保护区管理局, 灵宝 472500;

3. 郑州大学 离子束生物工程省重点实验室, 郑州 450052)

摘要:采用分层取样的方法,沿小秦岭林区海拔梯度设立 56 块 20 m × 20 m 样地,用多元回归树(MRT)方法对小秦岭森林群落进行分类,采用除趋势对应分析(DCA)进行排序,用广义可加模型(GAM)研究不同生活型物种多样性沿海拔梯度分布格局。结果表明:(1)56 个样地进行 MRT 分类,经交叉验证并依据植物群落分类和命名原则,本区植物群落可分为 5 类;(2)样方 DCA 排序明确地揭示各群落类型生境分布范围,较好地反映小秦岭自然保护区森林群落与环境因子的关系;(3)不同生活型物种多样性指数随海拔梯度变化发生一定的波动,且呈现不同的多样性格局:丰富度指数中,乔木层呈显著的单峰分布格局,灌木层在中海拔段呈明显下降趋势,草本层随着海拔的升高总体呈下降趋势;Shannon-Wiener 多样性指数中,不同生活型物种随海拔变化趋势与物种丰富度变化趋势大体相同;不同生活型物种的均匀度指数随海拔变化趋势较平缓。

关键词:MRT;DCA;广义可加模型;物种多样性;海拔梯度

Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqinling

CHEN Yun¹, WANG Hailiang², HAN Junwang², WEI Boliang¹, JIA Hongru³, YE Yongzhong¹, YUAN Zhiliang^{1,*}

1 College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Administration Bureau of Xiaoqinling National Nature Reserve of Henan, Lingbao 472500, China

3 Henan Provincial Key Laboratory of Ion Beam Bio-engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: Forest community classification, ordination, and species diversity patterns along altitudinal gradients can reveal relationships between species distribution and environmental factors, providing an important basis for understanding the function of mountain ecosystems. Quantitative analysis is an important approach to research the community classification and sorting. And can reveal profoundly the ecological relationship between plant communities and environmental factors. Species diversity altitude gradient pattern study can further reflect the biological and ecological characteristics of species, distribution and its adaptability to the environment, to reveal the biological diversity environment gradient variation rule, and is important basis to know the mountain ecosystem function and carries on the reasonable operation. But different area and different life forms of species due to the restriction of various factors and present different gradient pattern. Therefore, for a specific mountain to carry out a case study of the species diversity altitude pattern is very necessary to. Xiaoqinling Nature Reserve is located at the intersection of northern, northeastern, central and southwestern plant community types resulting in rich plant resources. The unique geography, climate, and vegetation conditions make Xiaoqinling an ideal location to research forest communities. Few studies exist about the number of forest community types and species diversity

基金项目:河南省科技攻关(132102110133);河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A180013)

收稿日期:2013-08-16; 修订日期:2014-03-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlyuan163@163.com

along an altitudinal gradient in Xiaoqinling. However, in recent years, due to population pressures and large-scale economic development there have been declines in biodiversity in protected areas. We conducted a field investigation of 56 plots (20 m × 20 m) in Xiaoqinling. The main site factors, forest communities were classified through ordination and species diversity patterns along the altitudinal gradient were analyzed using multivariate regression trees (MRT), detrended correspondence analysis (DCA), and generalized additive model (GAM). Results showed that, (1) forest communities were classified into 5 types by MRT. I: *Euptelea pleiospermum*-*Acer grosseri*-*Glechoma longituba* + *Poa acroleuca* Association, II: *Pinus armandii* + *Betula utilis*-*Salix phylicifolia*-*Carex siderosticta* Association, III: *Quercus mongolica*-*Rosa bella*-*Cayerus compressus* Association, IV: *Pinus armandii* + *Quercus baronii* var. *baronii* + *Cotinus coggygria*-*Forsythia suspensa*-*Cayerus compressus* Association, V: *Pinus armandii* + *Pinus tabulaeformis*-*Acer grosseri*-*Oplismenus undulatifolius* Association; (2) the results of DCA clearly reflected the distribution range of various community types and better reflect relationships between species distribution and environmental factors; (3) GAM simulation results show that along an altitudinal gradient woody have clearer distribution patterns than herbs. Richness index in the tree layer showed a significant unimodal distribution pattern, the shrub layer showed a downward trend in mid-elevation and herbaceous layer showed a downward trend with increasing altitude. The Shannon-Wiener index showed the same trends as the richness index. The Pielou index of three-layer distribution showed little variation with increasing altitude. Forest community structure and vertical pattern of species diversity vary with altitude gradient have important significance to reveal biodiversity environment gradient variation rule. The results help to deeply understand the space distribution pattern of forest community and ecological characteristics of species and for the future provide the corresponding theoretical basis for management and protection, as well as to elucidate mountain flora distribution and diversity of vertical distribution pattern to accumulate basic data.

Key Words: MRT; DCA; GAM; species diversity; elevation gradient

植被群落分类与排序一直是植被生态学研究中最基本、最困难的问题^[1]。数量分析则可以深刻地揭示植物种、植物群落与环境因子间的生态关系,是研究群落分类与排序的重要途径^[2]。目前,常用的植被数量分类方法有很多,如排序、聚类、双向指示种分析(TWINSPAN)等,但这些方法均需要人为判别。多元回归树是一种较新的数量分类方法^[3],无需人为确定分类结果,较以往的数量分类方法更客观,并在近来的相关研究实践中取得了很好的分类结果^[4-5]。

物种多样性海拔梯度格局研究可以更深入反映物种的生物学、生态学特性,分布状况及其对环境的适应性,对揭示生物多样性环境梯度变化规律具有重要意义^[6],是了解山区生态系统功能并对其进行合理经营的重要依据^[7]。但不同区域及不同生活型的物种由于受不同因子的制约呈现不同的梯度格局^[8-10],因此,对特定山地开展物种多样性海拔格局的案例研究非常必要^[11]。

小秦岭自然保护区位于豫、陕两省交界的灵宝市西部,东接崤山丘陵,西连秦岭主脉,南倚莽莽群山,北临滔滔黄河,属暖温带—亚热带过渡区^[12]。该区生物资源丰富,区系成分复杂,植被垂直带谱明显,是开展森林群落及物种多样性垂直分布格局研究的理想场所。目前在本区开展的研究多是有关植物资源^[12-14]、珍贵物种^[15]、物种空间分布格局^[16]等方面,而植物群落分类、排序及物种多样性格局的相关研究还没见报道。

本文以小秦岭自然保护区森林群落为研究对象,采用分层取样的方法,对56个样地的物种进行全面调查,运用MRT和DCA排序法综合分析森林群落之间及森林群落与环境之间的关系,并用GAM模型研究物种多样性沿海拔梯度分布格局,揭示植被及其环境因子空间分布格局,以期小秦岭自然保护区的保护提供理论基础,同时也为阐明本区山地植物群落分布和多样性垂直分布格局积累基础资料。

1 研究区概况

小秦岭国家级自然保护区的地理坐标为北纬 34°23′—34°31′,东经 110°23′—110°44′,保护区东西长 31 km,南北宽 12 km,总面积 15160 hm²,森林覆盖率 81.2%,其主峰老鸦岔坨高 2413.8 m,为河南最高峰。本区气候属暖温带大陆性季风型半干旱气候,四季分明,年均温 11.2—14.2 ℃,极端低温 -17 ℃,极端高温 42.7 ℃,无霜期 170—215 d,年降水量 620 mm 左右,土壤类型南坡是棕壤、黄棕壤,北坡是褐土。

2 研究方法

2.1 样方调查

2012 年 8 月在研究区内选择具代表性的山体,从山麓 1020 m 到山顶 2413 m 沿海拔梯度设置样地,海拔每升高 50 m 在山体南、北两侧选择具代表性的群落分别设置 1 个 20 m × 20 m 的乔木样方,在乔木样方中选择典型群落设置 1 个 5 m × 5 m 的灌木样方,在乔木样方的 4 个角分别设置 1 个 1 m × 1 m 的草本样方,共设置乔、灌、草样方 336 个。乔木样方采用 GPS 定位,记录其海拔、坡度、坡向,及胸径 ≥ 1 cm 乔木种类、数量、胸径、树高和冠幅。灌木和草本样方分别记录物种名、多度、盖度和高度。

2.2 数据处理

2.2.1 重要值

对每个样地分别计算乔木、灌木和草本的重要值,其公式如下^[17]:

乔木、灌木 = (相对多度 + 相对胸高断面面积 + 相对盖度) / 3

草本 = (相对多度 + 相对盖度) / 2

2.2.2 多样性指数

分别计算每个样地内乔木、灌木和草本植物的生物多样性。

(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 为样地内的物种数目; P_i 为中 i 的相对重要值, $P_i = \frac{N_i}{N}$; N_i 为种 N 的重要值; N 为种 i 所在样地的各个种的重要值之和。

2.3 多元回归树

MRT 是一种较新的研究物种分布与环境因子之间关系的数量分类方法。它将环境因子梯度作为分类节点,利用递归划分法,将样地划分为尽可能同质的类别,减少样地中群落的非相似性,同时采用交叉验证来确定分类结果,能很好地反映异质环境下群落的结构特征^[3]。本研究采用 56 个样地海拔、坡向和坡度为自变量,405 种植物在 56 个样地内的重要值为因变量进行群落分类。MRT 采用 R 语言 mvpart 程序包进行运算^[18]。

2.4 DCA 排序

除趋势对应分析 (DCA) 是以 CA (Correspondence analysis, CA) 和 RA (Redundancy analysis, RA) 为基础修改而成的,是植被分析中较为有效的一种方法,特别是同分类结合使用,效果要好于 CCA (Canonical correspondence analysis, CCA)^[19]。本研究用 R 语言 vegan 程序包^[20],以 405 × 56 维重要值矩阵进行 DCA 数量排序,分析它们与环境因子之间的关系。

2.5 回归分析

广义可加模型 (GAM) 是广义线性模型的进一步推广,是通过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,其拟合曲线能最大限度的符合原始数据。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。GAM 分析用 R 语言 gam 程序包完成^[21]。

采用 GAM 模型的偏差 (D^2) 评价拟合结果,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 是指模型可解释的偏差,相当于线性回归模型中回归系数 R^2 , 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不能解释的偏差^[22]。

3 结果与分析

3.1 MRT 数量分类

将 56 个样地进行 MRT 分类,经交叉验证并依据植物群落分类和命名原则,本区植物群落可分为 5 类(图 1)。5 种群落类型的总体多样性指数随海拔梯度变化情况如图 2 所示。

I 领春木 (*Euptelea pleiospermum*)-葛萝槭 (*Acer grosseri*)-活血丹 (*Glechoma longituba*)+白顶早熟禾 (*Poa acroleuca*) 群落,包括样地 14—41,共 28 个样地。该群落分布于海拔 1345—2048 m,土壤为棕壤或棕色森林土,气候冬冷夏凉、年降水量 1500 mm 左右。本带分布面积广,森林覆盖率高,林木蓄积量大,乔木层的优势种为领春木,主要伴生种为华山松 (*Pinus armandii*)、野漆 (*Toxicodendron succedaneum*) 等;灌木层的优势种为葛萝槭,主要伴生种为多腺悬钩子 (*Rubus phoenicolasius*)、连翘 (*Forsythia suspensa*)、菝葜 (*Smilax china*) 等;草本层优势种为活血丹和白顶早熟禾,主要伴生种为蛇莓 (*Duchesnea indica*)、宽叶薹草 (*Carex siderosticta*)、细叶薹草 (*Carex duriusata* subsp. *stenophylloides*) 等。

II 华山松 (*Pinus armandii*)+糙皮桦 (*Betula utilis*)-东陵山柳 (*Salix phylicifolia*)-宽叶薹草 (*Carex siderosticta*) 群落,包括样地 44—56,共 13 个样地。该群落分布于海拔 2100—2413 m,地势陡峻,岩石裸露、山风强烈,周围无高大林木,群落呈矮态。乔木层的优势种为华山松,主要伴生种为秦岭冷杉 (*Abies chensiensis*)、红端木 (*Swida alba*)、陕甘花楸 (*Sorbus koehneana*) 等;灌木层的优势种为东陵山柳,主要伴生种为多腺悬钩子、花楸树 (*Sorbus pohuashanensis*) 等;草本层优势种为宽叶薹草,主要伴生种为六叶葎 (*Galium asperuloides* subsp. *hoffmeisteri*)、糙苏 (*Phlomis umbrosa*)、紫菀 (*Aster tataricus*)、茜草 (*Rubia cordifolia*) 等。

III 蒙古栎 (*Quercus mongolica*)-美蔷薇 (*Rosa bella*)-莎草 (*Cyperus compressus*) 群落,包括样地 42、43,共 2 个样地。该群落分布于海拔 2048—2100 m,土壤为棕色森林土,气候寒冷,风大,无霜期 210 d,年降水量 1500 mm 左右。乔木层的优势种为蒙古栎,主要伴生种为华山松、青杨 (*Populus cathayana*)、青楷槭 (*Acer tegmentosum*) 等;灌木层的优势种为美

蔷薇,主要伴生种为槲栎 (*Quercus aliena*)、山梅花 (*Philadelphus incanus*) 等;草本层的优势种为莎草,主要伴生种为宽叶薹草、盘果菊 (*Prenanthes tatarinowii*) 等。

IV 华山松 (*Pinus armandii*)+槲子栎 (*Quercus baronii* var. *baronii*)+黄栌 (*Cotinus coggygia*)-连翘 (*Forsythia suspensa*)-莎草 (*Cyperus compressus*),包括样地 1、2、3、5、6、9、12,共 7 个样地。该群落分布于 1020—1345 m 的阴坡上,与南坡水热条件存在差异,植被主要为华北暖温带的植物区系特征。乔木层的优势种为华山松,主要伴生种为油松 (*Pinus tabulaeformis*)、野漆等;灌木层的优势种为连翘,主要伴生种为悬钩子等;草本层的优势种为莎草,主要伴生种为宽叶薹草、荩草 (*Arthraxon hispidus*)、早熟禾、酢浆草 (*Oxalis corniculata*) 等。

V 华山松 (*Pinus armandii*)+油松 (*Pinus tabulaeformis*)-葛萝槭 (*Acer grosseri*)-求米草 (*Oplismenus undulatifolius*) 群落,包括样地 4、7、8、10、11、13,共 6 个样地。该群落位于海拔 1020—1345 m 的阳坡上,植被有亚热带特色。乔木层的优势种为华山松,主要伴生种为葛萝槭、野漆、黄槿子等;灌木层的优势种为葛萝槭,主要伴生种为粗榧 (*Cephalotaxus sinensis*)、连翘等;草本层的优势种为求米草,主要伴生种为莎草、细叶薹草、荩草等。

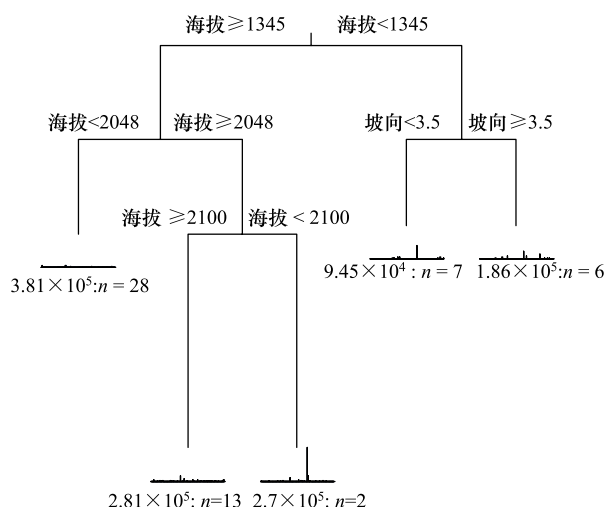


图 1 56 个样地的多元回归树分类树状图

Fig.1 Dendrogram of the multivariate regression trees classification of 56 samples

n = 样方个体数

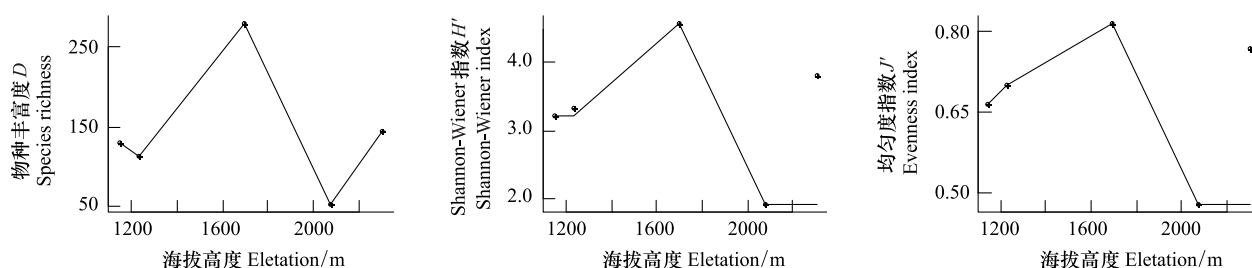


图2 小秦岭自然保护区不同植物群落物种多样性海拔梯度的变化

Fig.2 Changes trend in species diversity of different plant community types along an altitudinal gradient in Xiaoqinling Nature Reserve

3.2 样方 DCA 排序分析

通过 DCA 分析得到前 4 个排序轴的特征值分别为:0.6759、0.6438、0.4918、0.4333。第一排序轴的特征值最大,第二轴次之,前两个排序轴所包含的生态信息量较大,能够体现出重要的生态意义。从 56 个样地 DCA 二维排序图可以看出(图 3),第一排序轴(横轴)基本上反映了海拔高度由高到低的变化梯度;第二排序轴(纵轴)反映了植物群落坡向由阴坡到阳坡的变化梯度。

排序图中 56 个样地可以划分成 A、B、C 和 D 四个生态区,较好地反应了植物群落与环境因子之间的相互关系。A 和 B 区主要包括群落 V 和群落 IV,

分布在 1020—1345 m 之间;C 区中主要为群落 I,分布在 1345—2048 m 之间,D 区主要包括群落 II,分布在 2100—2413 m 之间。随着海拔高度的增加,环境中的水热因子等相应发生变化,群落中的植物种类组成也表现出一定的差异^[23-24]。例如群落中乔木的优势种由低海拔的华山松、黄榧子、油松,逐渐变为高海拔的华山松和糙皮桦;灌木低海拔的优势种连翘和葛萝槭,被分布于较高海拔的东陵山柳等取代;草本植物的优势种由莎草和求米草变为宽叶薹草。也就是说,随着海拔高度的增加,温度逐渐降低,群落优势种的耐寒性逐渐增强。

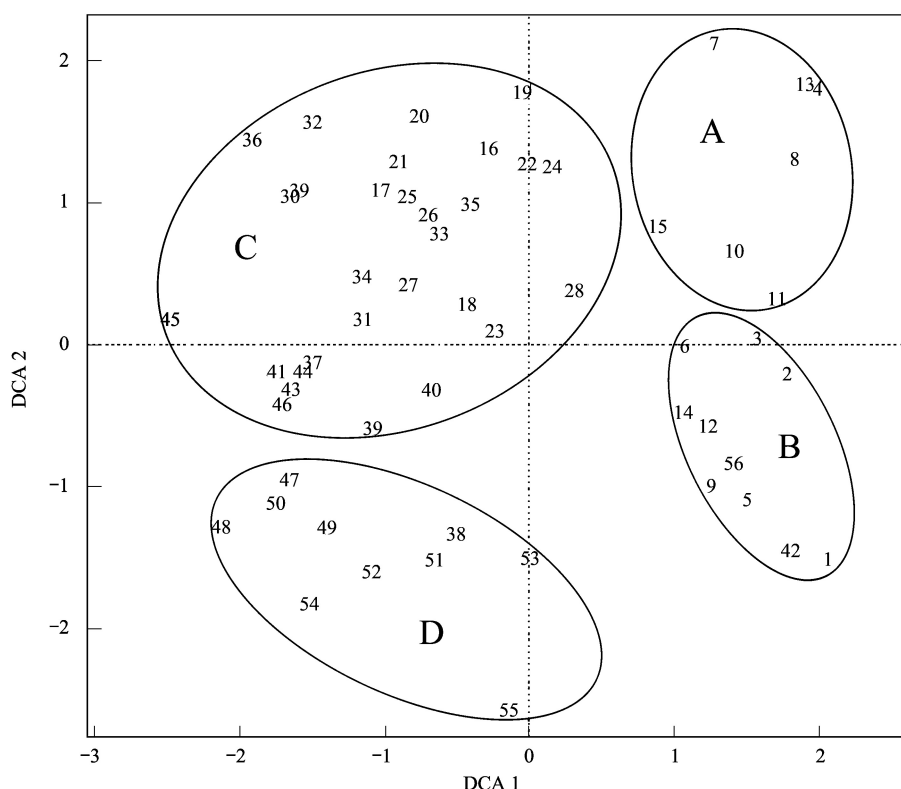


图3 小秦岭自然保护区 56 个植物样地的 DCA 二维排序图

Fig.3 Two-dimensional DCA ordination diagram of 56 quadrats of plant community in Xiaoqinling Nature Reserve

3.3 海拔对物种多样性分布的影响

从表 1 中可看出海拔与不同生活型物种的各多样性指数相关程度不同,GAM 拟合模型中 D^2 反应了模型可解释的偏差。乔木层 3 个指数的相关程度最大, D^2 介于 13.1%到 20.2%,灌木层 3 个指数的 D^2 介于 7.1%到 8.6%,草本层 3 个指数的 D^2 介于 1.4%到 9.3%。

物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数随海拔梯度变化如图 4 所示,从图中可以看出不同生活型的物种丰富度对环境变化的敏感程度不同。物种丰富度中,乔木层总体上中海拔区域较高,

低海拔、高海拔区物种丰富度较低,其中海拔 1345—2048 m 的样地最高,该区乔木层物种比较丰富,亚优势种和伴生种较多,如华山松、野漆;灌木层物种丰富度在中海拔区域呈下降趋势,其余海拔下物种丰富度呈增长趋势;草本层物种丰富度随着海拔的升高总体呈下降趋势。Shannon-Wiener 多样性指数中,乔木层、灌木层和草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数随海拔变化趋势与物种丰富度变化趋势大体相同。物种均匀度中,乔木层、灌木层和草本层均匀度指数随海拔变化趋势较平缓。

表 1 GAM 模型的偏差表
Table 1 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 Elevation	乔木层丰富度指数 D_1	90.127	72.018	0.201
海拔	灌木层丰富度指数 D_2	111.151	102.832	0.075
海拔	草本层丰富度指数 D_3	28.509	25.862	0.093
海拔	乔木层 Shannon-Wiener 指数 H'_1	6.742	5.381	0.202
海拔	灌木层 Shannon-Wiener 指数 H'_2	6.063	5.54	0.086
海拔	草本层 Shannon-Wiener 指数 H'_3	2.431	2.251	0.074
海拔	乔木层均匀度指数 J'_1	1.236	1.074	0.131
海拔	灌木层均匀度指数 J'_2	3.149	2.927	0.071
海拔	草本层均匀度指数 J'_3	0.184	0.182	0.014

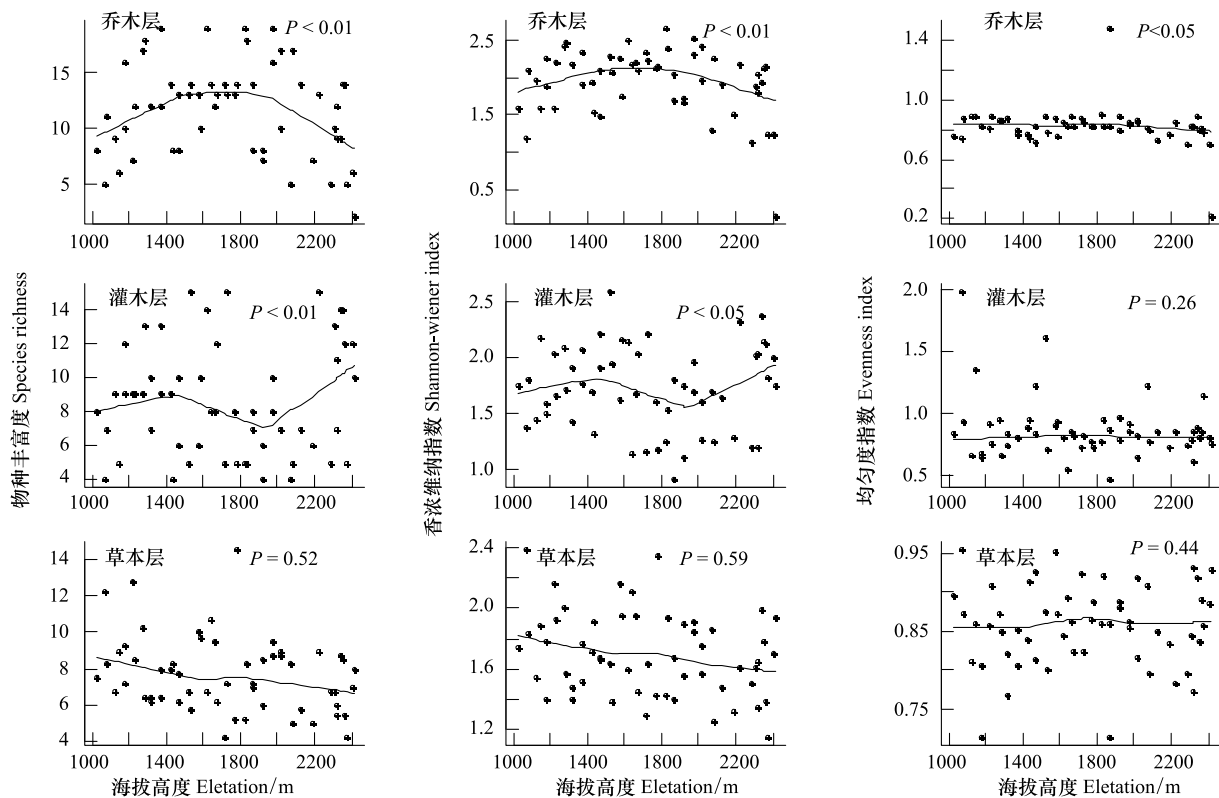


图 4 小秦岭自然保护区物种多样性海拔梯度的变化

Fig.4 Varition of species diversity along altitudinal gradient of Xiaoqinling Nature Reserve

4 结论与讨论

群落物种组成是沿着环境因子梯度连续渐变的,没有明显的界限,根据植物群落本身的特征进行群落划分困难很大。群落分类不仅要求种类组成和结构相对一致,占据的生境也是重要的特征^[1]。在生境异质性比较大的地方,地形因子是形成生境的最根本因素之一^[25]。因此,采用基于地形因子和物种组成数据的 MRT 技术将小秦岭自然保护区 56 块样地的 405 种植物分成了 5 类,结果显示每个群落类型给都有各自的物种组成和群落特征,并占据着不同的生境。由图 2 可看出 5 类群落丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数随海拔变化呈现出较为一致的变化趋势,即不对称的单峰分布格局,这是因为中海拔比高海拔地区水热条件更为适宜,相对于低海拔干扰较少有关。

DCA 排序结果较好地反映了植物群落之间以及植物群落与环境因子之间的相互关系。MRT 划分的 5 种群落类型与样地在 DCA 排序图上散布格局吻合也较好,说明同分类方法结合使用 DCA 效果较好,它较准确地反映出各森林群落之间以及森林群落与环境之间的关系。DCA 第一排序轴主要反映了海拔的变化,第二排序轴主要反映了坡向的变化。海拔和坡向等生态因子对群落生境热量和湿度等的影响,导致群落类型分布呈现出一定的梯度变化。

MRT 和 DCA 分析结果均表明海拔是影响小秦岭物种多样性分布格局的重要环境因素,为进一步揭示小秦岭自然保护区海拔因素对物种分布格局和多样性的影响,运用 GAM 模型拟合海拔与不同生活型物种各多样性指数的相关关系。乔木层多样性与海拔拟合模型的效果相对较好,特别是丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数, D^2 值分别为 20.1%、20.2%,这与假设是相符的,而灌木层、草本层与海拔相关程度较小,这是因为除海拔外,乔木层的熊高断面积也对灌木层和草本层的物种分布产生一定的影响,特别是草本层, F 测验显示 3 个指数与海拔相关程度均不显著,这与很多研究是一致的,即沿环境梯度,不同生活型的物种多样性差异较大,木本植物具有比草本植物更为明确的分布格局^[26]。另外拟合模型的偏差均小于 1 也说明除了除海拔外还有其他的因素影响物种的分布,这些都有待进一步研究。

在不同研究尺度和不同区域,植物多样性沿海拔梯度具有不同分布格局,主要有 5 种形式,分别是随海拔升高先降低后升高、先升高后降低、单调升高、单调下降和没有明显格局^[27]。小秦岭自然保护区物种多样性沿海拔梯度发生一定的波动,且乔、灌、草 3 层的物种多样性随海拔变化呈现不同的多样性格局。乔木层物种丰富度呈单峰曲线,即在中海拔物种丰富度最高,这是因为中海拔的水热条件适宜,相对于低海拔干扰较少有关。灌木层的丰富度在中海拔呈下降趋势,这可能是因为中海拔乔木层物种丰富,受郁闭度影响,限制了灌木的发育。草本层物种丰富度沿海拔梯度呈下降趋势,中海拔地段可能是受乔木层、灌木层郁闭度的影响,到高海拔地段,温度降低到只适合部分物种生长,所以物种丰富度也不高。Shannon-Wiener 指数与物种丰富度变化趋势大体相同,这是因为两指数间有一定的相关性,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,这与相关研究一致^[28-29]。3 个层次的均匀度指数随海拔的升高分布平缓,变化幅度均不是很大,群落的发展、替代速率较稳定,与干扰、水热条件、小生境的影响等有很大关系。

森林群落组成和物种多样性随海拔梯度垂直变化格局对揭示生物多样性环境梯度变化规律具有重要意义,该结果有助于深入理解保护区森林群落的空间分布格局及各物种的生态适应特性,为今后保护区管理和保护提供相应的理论依据,同时也为阐明山地植物群落分布和多样性的垂直分布格局积累基础资料。

References:

- [1] Wu Z Y. Vegetation of China. Beijing: Science Press, 1980: 1-1375.
- [2] Zhang J T. Quantitative Ecology. Beijing: Science Press, 2004: 1-372.
- [3] De' Ath G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. Ecology, 2002, 83 (4): 1105-1117.
- [4] Lai J S, Mi X C, Ren H B, Ma K P. Numerical classification of associations in subtropical evergreen broad-leaved forest based on multivariate regression trees — a case study of 24 hm² Gutianshan forest plot in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34 (7): 761-769.
- [5] Zhang R, Liu T. Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6056-6066.
- [6] 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.
- [7] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405 (6783): 220-227.
- [8] Rahbek C. The relationship among area, elevation, and regional species richness in neotropical birds. *The American Naturalist*, 1997, 149(5): 875-902.
- [9] Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 224-239.
- [10] Lomolino M V. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(1): 3-13.
- [11] 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.
- [12] Ye Y Z, Yuan Z L, You Y, Li X W. A preliminary study of the bryoflora of Xiaoqinling Nature Reserve in Henan Province. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(8): 1472-1475.
- [13] Wang H L, Li D L. Distribution and utilization of euonymus in Henan Xiaoqinling. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2010, 25(4): 348-351.
- [14] Huang D, Wang J, Li D L, Wang H L. Distribution and utilization of *Lonicera* in Xiaoqinling, Henan. *Chinese Wild Plant Resources*, 2010, 29(1): 28-31.
- [15] Wang H L, Yao G Z, Han J W, Zhang Y, Zhang Y F. Henan Xiaoqinling national nature reserve *Abies Chensiensis* growth investigates and analyzes. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2006, 26(3): 24-25.
- [16] Wang H L, Zhuang J J, Zhang K. Major species spatial distribution pattern of the transit station plots in Henan Xiaoqinling Nature Reserve. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, 46(4): 385-391.
- [17] Zhang X P, Wang M B, She B, Xiao Y. Quantitative classification and ordination of forest communities in Pangquangou National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 754-761.
- [18] De'ath G. Package 'mvpart'. 2010.
- [19] Su R G G, Zhang J T, Zhang B, Cheng J J, Tian S G, Zhang Q D, Liu S J. Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [20] Oksanen J, Blanchet F G, Kindt R, Legendre P, O'Hara R B, Simpson G L, Solymos P, Stevens M H H, Wagner H. Package 'vegan'. 2010.
- [21] Trevor Hastie, Package 'gam'. 2013.
- [22] 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.
- [23] Wimberly M C, Spies T A. Influences of environment and disturbance on forest patterns in coastal Oregon watersheds. *Ecology*, 2001, 82(5): 1443-1459.
- [24] Zhao C M, Chen W L, Tian Z Q, Xie Z Q. Altitudinal pattern of plant species diversity in Shennongjia Mountains, Central China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(12): 1431-1449.
- [25] Fang J Y, Shen Z H, Cui H T. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 10-19.
- [26] O'Brien E M. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of Southern Africa's woody flora. *Journal of Biogeography*, 1993, 20(2): 181-198.
- [27] 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.
- [28] Ojeda F, Maranon T, Arroyo J. Plant diversity patterns in the Aljibe Mountains (S. Spain): a comprehensive account. *Biodiversity and Conservation*, 2000, 9(9): 1323-1343.
- [29] 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.

参考文献:

- [1] 吴征镒. 中国植被. 科学出版社, 1980: 1-1375.
- [2] 张金屯. 数量生态学. 科学出版社, 2004: 1-372.
- [4] 赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平. 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类——以古田山 24 公顷森林样地为例. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 761-769.
- [5] 张荣, 刘彤. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类. *生态学报*, 2012, 32(19): 6056-6066.
- [11] 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.
- [12] 叶永忠, 袁志良, 尤扬, 李孝伟. 小秦岭自然保护区苔藓植物区系分析. *西北植物学报*, 2004, 24(8): 1472-1475.
- [13] 王海亮, 李冬林. 河南小秦岭卫矛属植物资源的分布与开发利用研究. *河北林果研究*, 2010, 25(4): 348-351.
- [14] 黄栋, 王谨, 李冬林, 王海亮. 河南小秦岭忍冬属植物的分布及资源利用探讨. *中国野生植物资源*, 2010, 29(1): 28-31.
- [15] 王海亮, 姚冠忠, 韩军旺, 张莹, 张亚芳. 河南小秦岭国家级自然保护区秦岭冷杉生长调查与分析. *河南林业科技*, 2006, 26(3): 24-25.
- [16] 王海亮, 庄静静, 张凯. 河南小秦岭自然保护区西曼林区样地主要物种的空间分布格局. *河南农业大学学报*, 2012, 46(4): 385-391.
- [19] 苏日古嘎, 张金屯, 张斌, 程佳佳, 田世广, 张钦弟, 刘素军. 松山自然保护区森林群落数量分类和排序. *生态学报*, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [22] 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.
- [25] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. *生物多样性*, 2004, 12(1): 10-19.
- [27] 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.
- [29] 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.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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 杨永兴

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 34 卷 第 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 2014)

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

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

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

订 购 全国各地邮局

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

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

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

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

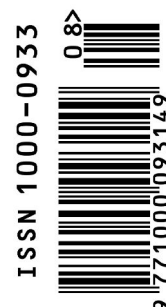
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@ cspg. net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元