•研究报告•

基于SOM的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释

杨国栋^{1,2} 季芯悦^{1,2} 陈 林^{1,2} 钟育谦³ 翟飞飞³ 伊贤贵^{1,2*} 王贤荣^{1,2}

1 (南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

2 (南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

3 (江苏省野生动植物保护站, 南京 210036)

摘要: 本文采用自组织特征映射网络(self-organizing map, SOM)对南京老山野生秤锤树(*Sinojackia xylocarpa*)群落进行数量分类和排序, 分析了其与环境因子之间的关系。结果表明: (1) SOM将秤锤树野生群落的100个样方划分为5个群丛类型, 分类结果在空间上反映了秤锤树野生群落的演替变化趋势, 各群丛的群落结构和物种组成存在差异且群丛界限明显, 可较好地排序与分类的环境解释。(2)通过环境因子梯度的可视化方法, 确定了海拔、坡位和土壤厚度是影响该地区秤锤树生长和分布的主要因子, 同时也揭示了以不同优势种为代表的各群丛和环境因子的关系。(3) SOM可以摆脱许多定量技术的限制性假设, 使得神经网络对于群落生态特征及探索群落和环境相互关系具有良好展潜力; SOM群落生态数据具有更高的映射能力, 进行群落分类以及较少程度的排序的潜力, 将有利于不同群落类型的分类和管理, 对于濒危植物保护具有重要意义。

关键词: 秤锤树; 环境因子; 自组织特征映射网络; 野生群落; 梯度分析

Spatial distribution and environmental interpretation of wild *Sinojackia xylocarpa* communities based on self-organizing map (SOM)

Guodong Yang^{1,2}, Xinyue Ji^{1,2}, Lin Chen^{1,2}, Yuqian Zhong³, Feifei Zhai³, Xiangui Yi^{1,2*}, Xianrong Wang^{1,2}

1 Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

2 College of Biology and the Environment and the Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

3 Protection Station of Wild Animals and Plants in Jiangsu Province, Nanjing 210036

Abstract: A self-organizing map (SOM) based on field investigations was adopted to analyze the numerical classification and ordination of wild *Sinojackia xylocarpa* communities in the Nanjing Laoshan Forest Park in hopes of illuminating the relationship between the wild communities and environmental conditions. The results show that the 100 quadrats were divided into five associations, spatially reflecting the successional trend of wild *S. xylocarpa* communities. The association boundary, community structure and species composition differed significantly among communities. Through visualizing environmental gradients, the altitude, slope position and soil thickness were found to be the main factors affecting the growth and distribution of *S. xylocarpa* in this area, though the relationships differed among dominant species. The SOM removes the restrictive assumptions of many quantitative techniques so that the neural network is attractive to the community ecological characteristics and the interrelationship between community and environment can be explored. Based on the potential of SOM for vegetation data classification and, to a lesser extent, ordination, the SOM can aid in the conservation of endangered plants across different community types.

Key words: *Sinojackia xylocarpa*; environmental factor; self-organizing map; wild community; gradient analysis

收稿日期: 2018-01-19; 接受日期: 2018-09-12

基金项目: 绿色江苏专项资金(2130205)和第二次全国重点保护野生植物资源调查专项资金(031010251)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yimutou@sohu.com

秤锤树(*Sinojackia xylocarpa*)是我国Ⅱ级重点保护野生植物,为我国特有的安息香科落叶灌木或小乔木,具有较高的观赏价值,零星分布于江苏南京及周边地区海拔500–800 m的林缘或疏林中,对于安息香科的系统发育研究具有重要意义。由于分布区狭窄、种群数量小,自20世纪70年代以来,在多次调查中均未发现其野生种群,全国第一次重点保护野生植物资源调查过程中也未发现其野生植株,推测它在江苏可能已经野生灭绝,部分学者推测其已经野外灭绝(郝日明等, 2000; 陈瑞冰等, 2015)。但在2016年全国第二次重点保护野生植物资源调查中,笔者在南京老山国家森林公园内发现了秤锤树天然种群的分布(图1)。为了保护这一天然种群,分析其所在群落的空间结构及与环境因子之间的关系,了解其在群落中的地位是第一步。

目前主要以聚类分析,双向指示种分析和多元回归树3种数量分析方法来探讨植物群落与环境因子之间的关系。但由于植物物种及群落与生态环境因子之间主要为非线性关系(Olawoyin et al, 2013),再加上秤锤树分布地域狭窄并长期受到外界因素干扰,其群落与环境因子之间的关系复杂多样,上述3种以相关分析为基础的多因素、多条件的线性排序方法不能很好地分析其群落生态因子之间的相互作用关系(张钦弟等, 2011)。神经网络理论

(neural network theory)中对非线性、复杂问题处理能力较强(李林峰等, 2014)的自组织特征映射网络(self-organizing map, SOM)被逐渐引入到植物生态学研究,它能将高维空间复杂的环境因子经过多次压缩和特征抽取而清晰地表达在低维空间,从而更客观准确地实现植物群落的排序和聚类。目前,SOM被广泛应用于生物群落的分类、动态预测等领域(Olawoyin et al, 2013),可有效避免传统聚类算法在确定聚类数目上的盲目性和不确定性(Zhang et al, 2007),成为研究生物群落结构特征的有效手段之一。

基于此,本文以该秤锤树种群的样地调查数据为基础,应用自组织特征映射网络(SOM)对秤锤树群落进行数量分类和排序,以明确其野生群落的空间结构与环境因子之间的关系,为该物种的保护利用提供基础数据。

1 研究方法

1.1 样地设置与数据采集

参照CTFS (Center for Tropical Forest Science)标准(Condit, 1998),于2017年5月在秤锤树天然种群建立1 ha样地,并用全站仪分成100个10 m × 10 m的样方(图2),对地形参数(平均海拔、坡度和坡向)进行精确计算,对每个样方进一步用插值法细分为

图1 南京老山国家森林公园天然秤锤树种群分布位置

Fig. 1 The location of the natural population of *Sinojackia xylocarpa* in Nanjing Laoshan Forest Park

图2 基于MATLAB建模下的秤锤树1 ha样地示意图(红色区域为样地)

Fig. 2 The sketch map 1-ha sample plot of *Sinojackia xylocarpa* based on MATLAB modeling (The red area is plot)

4个5 m × 5 m的小样方(Harms et al, 2001)。参照孟宪宇(2006)对100个样方内的所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的乔木进行每木调查,记录种名、DBH、地理坐标、基径、树高、冠幅、枝下高等基本数据;参照丁晖等(2016)对于灌木和DBH < 1 cm的小乔木统计种类、株数和生长情况,草本统计种类、盖度和生长情况,建立数据库。

秤锤树1 ha样地内共记录维管束植物113种,隶属于45科75属。为提高SOM训练速度和学习率(Park et al, 2001),剔除频度较低的偶见种,对余下的84种植物进行分类和排序。植物物种重要值(IV)构成84 × 100维的物种数据矩阵,环境数据组成6 × 100维环境数据矩阵(张金屯等, 2008)。

以重要值表现群落中各物种的优势度指标,指示其在群落中的功能地位。

(1)树木重要值 IV_{tree} = (相对覆盖度 + 相对显著度 + 相对高度)/300

(2)灌木重要值 IV_{shrub} = (相对覆盖度 + 相对高度)/200

(3)草本重要值 IV_{herb} = 相对覆盖度/100

通过挖取剖面测量土壤厚度,采用电位法测定土壤pH值;每个样方(10 m × 10 m)的海拔取其4顶点的海拔平均值;随机取4顶点中的3个构成平面,组成4个不同的平面,其与样方投影水平面夹角的平均值为样方坡度,与正北方向偏差角度的平均值为样方坡向值;坡位采用凹凸度(convexity)的算法,由CTFS package进行计算(Valencia et al, 2004; 赖江山等, 2010)。

1.2 自组织映射和数据匹配

自组织特征映射网络是一种通过与神经网络相似的权值调整方法,将高维数据点降维有序地映射到二维网格上实现低维可视化的方法(杨黎刚, 2007)。该算法通过降低数据排序的维数来将高度非线性关系转化为简单的几何关系。已有研究表明基于SOM的数据排序和聚类适用于高度复杂和非线性的数据(Kim et al, 2012)。

SOM的网络结构由输入和输出两层组成,它们之间的连接由权重向量确定,权重向量与层的每个节点完全关联。当训练数据被输送到网络时,计算所有加权向量的欧几里德距离。与权重最接近的神经元被称为最佳匹配单位(BMU)。BMU的相应加权向量根据邻近的神经元进行更新和调整,其更新强度由于学习速率的降低而衰减。

在模型DBH训练中,最终选择符合最小量化和地形误差的SOM进行数据集中生态特征的聚类 and 模式化。根据基于色度对比度表示数据单元之间的欧几里德距离的U矩阵,通过K均值法进行聚类分析。随后,簇的数量由聚类分类集合之间的欧几里德距离确定。特别是在评估聚类的有效性时,聚类性能度量指标中的外部指标将聚类结果与参考模型结合进行比较。根据Davies-Bouldin指数(DBI)来确定,指数越小,聚类效果越好(Lu et al, 2014):

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left(\frac{\text{avg}(C_i) + \text{avg}(C_j)}{d_{cen}(\mu_i, \mu_j)} \right) \quad (1)$$

SOM的分类和排序在MATLAB 6.1平台上使用SOM工具箱(SOM Toolbox)通过编程完成。不同树种对其生存的环境条件的适应性不尽相同,在排序图上则表现为每个树种都有各自的分布中心和分布区域,根据环境聚类图把适宜分布区域对应到环境,就可以知道不同的环境因子对群落格局影响的大小(Li et al, 2018)。

1.3 多元回归树修正

多元回归树(MRT)以自变量为分类节点,将环境因子梯度作为分类节点,利用二歧式分割法,将样方划分为尽可能同质的类别(De'Ath, 2002)。采用多元回归树交叉验证来确定秤锤树野生群落SOM分类结果,将分类结果展示在100个样方分布图上,并对分类结果进行必要的修正。运用多元回归树法使得两个节点内部样方的差异尽量小,节点间样方

的差异尽量大, 然后对划分出来的两组样方采用同样的划分方法重复这一过程, 直到得到的分割结果满足条件或不能再分割为止。利用交叉验证对SOM分类结果进行剪枝, 以获得大小适合的回归树。MRT采用R语言中的mvpart程序包进行函数运算(谢益辉等, 2007)。

2 结果

2.1 群落分类

数据集的矢量分量被聚类在包含100个输出神经元的SOM平面上, 最终确定为5个聚类群(图3), 其中, 野生秤锤树群落和周围环境因子除了顶部优势外, 其余分布较为均匀。

依据K均值聚类规则和DBI指数划分的5块区

域对应了5个不同的群落类型(图4a), 通过微调获得野生秤锤树群落的5个植被群丛(图4b), 并依据群落生境特征的指示种和优势种命名群丛类型。

考虑到秤锤树在1 ha样地内空间分布的连续性, 图5B是图5A修正后的样方分布图。

具体群落分类结果如下:

(1)群落I: 群落主体由朴树(*Celtis sinensis*) + 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)(乔木层) – 老鸦柿(*Diospyros rhombifolia*) + 野蔷薇(*Rosa multiflora*)(灌木层) – 苦竹(*Pleioblastus amarus*) + 贯众(*Dryopteris crassirhizoma*)(草本层)构成, 含有27个样方。朴树是群落的建群种, 该群落地势陡峭, 海拔在200–210 m, 群落土壤厚度达51–53 cm, 养分肥沃, 以大树居多。

图3 自组织特征映射网络中的聚类模式(a)和按不同因子分类的层次聚类结构(b)
Fig. 3 The clustering pattern in the self-organizing maps (a) and the hierarchical clustering structure according to different factors (b)

图4 聚类算法评价指标Davies-Bouldin指数(DBI) (a)和秤锤树群落类型与其环境的关系(b)
Fig. 4 Clustering algorithm evaluation index Davies-Bouldin index (DBI) (a) and comparison of relationships among clusters and environmental variables (b)

图5 秤锤树1 ha样地5类群丛的100个10 m × 10 m的样方分布图。A: 修正前; B: 修正后。

Fig. 5 Map of the five associations at the scale of 10 m × 10 m in the 1 ha *Sinojackia xylocarpa* plot. A: Original; B: Revised.

(2)群落II: 群落主体由马尾松(*Pinus massoniana*) + 榆树(*Ulmus pumila*)(乔木层) – 山胡椒(*Lindera glauca*) + 秤锤树(灌木层) – 小果蔷薇(*Rosa cymosa*) + 木防己(*Cocculus orbiculatus*)(草本层)构成, 含有27个样方。马尾松是群落的建群种, 该群落西北坡向, 地形斜坡, 乔灌木三层分明, 盖度为30–40%。

(3)群落III: 群落主体由黄檀(*Dalbergia hupeana*) + 黄连木(*Pistacia chinensis*)(乔木层) – 白檀(*Symplocos paniculata*) + 茶条槭(*Acer ginnala*)(灌木层) – 井栏边草(*Pteris multifida*) + 小果菝葜(*Smilax davidiana*)(草本层)构成, 含有13个样方。黄檀是群落的建群种, 该群落地处半阳坡, 林间郁闭度不高, 灌木盖度40–50%。

(4)群落IV: 群落主体由秤锤树 + 白栎(*Quercus fabri*)(乔木层) – 柘树(*Cudrania tricuspidata*) + 狭叶山胡椒(*Lindera angustifolia*)(灌木层) – 卵叶糙苏(*Phlomis umbrosa*) + 海金沙(*Salvia japonica*)(草本层)构成, 含有11个样方。秤锤树是建群树种, 该群落土壤厚度适中, 地处阳坡。

(5)群落V: 群落主体由化香(*Platycarya strobilacea*) + 短柄枹(*Quercus glandulifera*)(乔木层) – 八角枫(*Alangium chinense*) + 垂珠花(*Styrax dasyanthus*)(灌木层) – 求米草(*Oplismenus undulatifolius*) + 明党参(*Changium smyrnioides*)(草本层)构成, 含有22个样方。建群种是化香, 群落郁闭度高, 灌木的盖度达到70–80%, 海拔115–120 m。

2.2 群落类型和环境因子的关系

SOM排序空间的环境变化梯度以SOM单元对应的各环境因子平均值来表现, 颜色越深则环境因子的平均值越大。在排序图(图6)中可见环境因子的变化, 海拔从下到上逐渐增高; 坡度从左到右逐渐减小, 坡度变缓; 坡位从下坡位变为上坡位; 坡向为1–6, 多为阳坡、半阳坡和半阴坡, 坡向从左到右逐渐变阴, 但其梯度显著度不如前三个环境因子; 土壤厚度与pH值的最大值分别列于排序图的左上角与右上角, 两者的变化梯度均不显著。由此可见, 海拔、坡位和坡度是影响秤锤树野生群落空间分布的主要环境因子。

群落类型分布和环境因子的梯度变化结果表明, 排序图纵轴由下至上主要表达了生境条件由暖干向冷湿方向变化的综合梯度, 揭示了海拔的垂直变化以及凋落物层厚度、土壤pH值和坡位的变化; 横轴由左至右反映了坡度逐渐变缓、坡向向阳的趋势, 两个梯度综合表达了野生秤锤树群落空间分布的环境变化。

2.3 物种排序

对秤锤树野生群落主要优势种的分布排序结果表明(图7), 群落中优势种的分布格局与相对应的群落类型的分布格局相似性较高, 5个群丛的分布中心与以其为优势种的群落位置一致。

在5个群落中, 除群丛I外, 秤锤树在所有群落随海拔高度增加而逐渐稀疏直至消失, 其所在群

图6 环境因子在自组织特征映射网络的排序空间
Fig. 6 Visualization of environmental variables on the trained self-organizing map (SOM) ordination diagram in gray scales

落优势种的分布在不同海拔上出现分化,即:高海拔群落以朴树、黄连木和马尾松为优势种,伴生老鸦柿和苦竹;低海拔区域则主要以秤锤树、化香和黄檀为优势种,伴生贯众、野蔷薇和海金沙。同时,榆树、刺槐和井栏边草几乎出现在所有5种群丛中,说明这三种植物分布均匀,适应性很强。

3 讨论

秤锤树为喜阳树种,且较一般落叶树种耐寒性更强,主要分布在山地阳坡下位,其群落结构除了受物种自身特性影响以外,还受多种非生物环境因素如温度、水分、土壤养分、海拔等的影响,其中海拔是各种非生物因子的综合体现(Sieben et al, 2017)。由于秤锤树种子外表皮木栓层坚硬,不易萌发,林下幼苗的分布与土壤含水量和土层厚度密切相关,且夏季汛期的地表径流对正在果期的秤锤树有种子传播作用,种群演替对坡位、土壤排水能力和土壤厚度要求较高,因而通常只在下坡位以及很少的中等坡位有分布。为研究南京老山野生秤锤树的群落结构和环境因子之间的关系,本研究采用自组织特征映射网络对复杂的影响因素进行分类排序,并采用群落的优势树种命名植被类型。研究结果表明,100个样方被分为5种群丛,各类型在拓扑

排序图上界限明确,并且有不同的分布范围和优势种,各个群丛的分布也有很明显的界限,说明排序结果可以较好地反映不同群落之间的生态关系,该分类结果是合理的。

为了进一步探究该分类结果中各群落分布与复杂的环境因子之间的关系,将环境因子在拓扑图上进行排序,发现海拔、土壤厚度、坡度、坡位是影响秤锤树群落空间分布的主要环境因子,其中海拔和土壤厚度可能是影响秤锤树分布的关键因素。究其原因,可能与海拔高度直接影响水热等气候因子有关。海拔较高的地区由于坡度大、土层薄,水分流失快,土壤受到冲刷而较为瘠薄,因而对植物的适应性要求较高,不利于秤锤树种子萌发,导致种群更新困难。同时,坡位、坡向等因素也会影响水热资源的分配,从而使不同海拔高度下种群的优势种差异明显,如朴树、黄连木、老鸦柿等比较适应海拔较高的环境,是群丛I和II的主要优势种;而秤锤树、柘树、贯众等要求较为湿润温暖、土层较厚的环境,因而在较低海拔地区形成优势种。特别的,马尾松和化香树等喜阳植物受坡向影响较大,其分布中心的坡向为西南坡向,能够接受到最多的日光照射;而以苦竹和黄檀为优势种的群落则受坡位影响明显,主要分布在中坡位的半阳面,同时还

图7 优势种在自组织特征映射网络(SOM)排序图上的梯度分布

Fig. 7 Gradient distributions of dominant species in the trained self-organizing map (SOM) ordination diagram in gray scales

受土壤因子影响,与野生秤锤树群落的生存空间有竞争趋势。另外,贯众、海金沙和井栏边草等在群落中生境相同和重叠,是群落主要的阴生蕨类植物,对水分和土壤要求较高,上坡位难以满足它们温暖潮湿、腐殖质较多的生境条件。

秤锤树野生种群分布区狭窄,受人为干扰程度大,在自然条件下其木质化种皮导致种子萌芽率极低,只有通过流水冲刷的机械性破损才能发芽(王世彤等, 2018),较高的环境压力和自身的种子生理特性是其种群日益缩减、面临濒危的主要原因。由于秤锤树在模式标本产地(南京幕府山)和原有标本记录产地均无野生种群分布,因此,南京老山国家森林公园内发现的野生种群对该物种的种质遗传资源保存具有重要意义。通过对老山的秤锤树群落空间结构和环境因子的研究,明确了秤锤树生存的独特环境结构,对维持其野生种群的幼苗更新和居群规模增长具有重要作用,为进一步研究秤锤树种群的濒危机制、制定保护策略和种质资源开发利用提供参考依据。

参考文献

- Chen RB, Zhang GF, Liu J, Li S (2015) Endangerment grade and protection priority of rare plant species in Baohuashan National Forest Park, Jiangsu Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31, 174–179. (in Chinese with English abstract) [陈瑞冰, 张光富, 刘娟, 李硕 (2015) 江苏宝华山国家森林公园珍稀植物的濒危等级及优先保护. *生态与农村环境学报*, 31, 174–179.]
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and Comparison with Other Plots*. Springer, Berlin.
- De'Ath G (2002) Multivariate regression trees: A new technique for modeling species–environment relationships. *Ecology*, 83, 1105–1117.
- Ding H, Fang YM, Yang XH, Yuan FY, He LH, Yao JF (2016) Community characteristics of a subtropical evergreen broad-leaved forest in Huangshan, Anhui Province, East China. *Biodiversity Science*, 24, 875–887. (in Chinese with English abstract) [丁晖, 方炎明, 杨新虎, 袁发银, 何立恒, 姚剑飞 (2016) 黄山亚热带常绿阔叶林的群落特征. *生物多样性*, 24, 875–887.]
- Hao RM, Huang ZY, Liu XJ, Wang ZL, Xu HQ, Yao ZG (2000) The natural distribution and characteristics of the rare and endangered plants in Jiangsu, China. *Chinese Biodiversity*, 8, 153–162. (in Chinese with English abstract) [郝日明, 黄致远, 刘兴剑, 王中磊, 徐惠强, 姚志刚 (2000) 中国珍稀濒危保护植物在江苏省的自然分布及其特点. *生物多样性*, 8, 153–162.]
- Harms KE, Condit R, Hubbell SP, Foster RB (2001) Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. *Journal of Ecology*, 89, 947–959.
- Kim DK, Jeong KS, Chang KH, La GH, Joo GJ, Kim HW (2012) Patterning zooplankton communities in accordance with annual climatic conditions in a regulated river system (Nakdong River, South Korea). *International Review of Hydrobiology*, 97, 55–72.
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) 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*, 34, 761–769. (in Chinese with English abstract) [赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平 (2010) 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*, 34, 761–769.]
- Li D, Monahan W B, Baiser B (2018) Species richness and phylogenetic diversity of native and non-native species respond differently to area and environmental factors. *Diversity & Distributions*, 24, 853–864.
- Li LF, Zhang JT, Zhou L, Shao D (2014) Application of self-organizing feature map to classification and ordination of *Picea wilsonii* forest in Luya Mountain Nature Reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(5), 1–7. (in Chinese with English abstract) [李林峰, 张金屯, 周兰, 邵丹 (2014) 自组织特征映射网络在芦芽山自然保护区青杆林分类和排序中的应用. *林业科学*, 50(5), 1–7.]
- Lu K, Wang Q, Xue J, Pan WG (2014) 3D model retrieval and classification by semi-supervised learning with content-based similarity. *Information Sciences*, 281, 703–713.
- Meng XY (2006) *Forest Mensuration*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract) [孟宪宇 (2006) 测树学. 中国林业出版社, 北京.]
- Olawayin R, Nieto A, Grayson RL, Hardisty F, Oyewole S (2013) Application of artificial neural network (ANN)–self-organizing map (SOM) for the categorization of water, soil and sediment quality in petrochemical regions. *Expert Systems with Applications*, 40, 3634–3648.
- Park YS, Kwak IS, Chon TS, Kim JK, Jorgensen SE (2001) Implementation of artificial neural networks in patterning and prediction of exergy in response to temporal dynamics of benthic macroinvertebrate communities in streams. *Ecological Modelling*, 146, 143–157.
- Sieben EJJ, Kotze DC, Job NM, Muasya AM (2017) The sclerophyllous wetlands on quartzite substrates in South Africa: Floristic description, classification and explanatory environmental factors. *South African Journal of Botany*, 113, 54–61.
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: Large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.

- Wang ST, Wu H, Liu MT, Zhang JX, Liu JM, Meng HJ, Xu YZ, Qiao XJ, Wei XZ, Lu ZJ, Jiang MX (2018) Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in central China. *Biodiversity Science*, 26, 749–759. (in Chinese with English abstract) [王世彤, 吴浩, 刘梦婷, 张佳鑫, 刘检明, 孟红杰, 徐耀粘, 乔秀娟, 魏新增, 卢志军, 江明喜 (2018) 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态. *生物多样性*, 26, 749–759.]
- Xie YH (2007) The application of the classification and re-gression tree based on the package rpart in R-language. *Statistics & Information Forum*, 22(5), 67–70. (in Chinese with English abstract) [谢益辉 (2007) 基于R软件rpart包的分类与回归树应用. *统计与信息论坛*, 22(5), 67–70.]
- Yang LG, Su HY, Zhang Y, Chu J (2007) A method of date mining based on SOM clustering and its application. *Computer Engineering & Science*, 29(8), 133–136. (in Chinese with English abstract) [杨黎刚, 苏宏业, 张英, 褚健 (2007) 基于SOM聚类的数据挖掘方法及其应用研究. *计算机工程与科学*, 29(8), 133–136.]
- Zhang CP, He P, Ji CH, Zhang ZY, Hu SJ, Gao S, Li JH (2007) A study on the numerical classification and ordination of medicinal conservation plant *Fagopyrum cymosum* communities in eastern Chongqing. *Journal of Southwest University*, 29, 107–113.
- Zhang JT, Meng DP, Xi YX (2008) Ordination of self-organizing feature map neural network and its application in the study of plant communities. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(1), 1–5. (in Chinese with English abstract) [张金屯, 孟东平, 席跃翔 (2008) 自组织映射神经网络排序及其在植物群落分析中的应用. *北京林业大学学报*, 30(1), 1–5.]
- Zhang QD, Zhang JT, Suri GG, Zhang B, Cheng JJ, Tian SG (2011) Self-organizing feature map classification and ordination of *Larix principis-rupprechtii* forest in Pangquangou Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 2990–2998. (in Chinese with English abstract) [张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 张斌, 程佳佳, 田世广 (2011) 庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序. *生态学报*, 31, 2990–2998.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠、周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 自组织特征映射网络的基本架构

Appendix 1 Basic architecture and learning process of self-organizing map
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-1.pdf>

附录2 群落分类群组的变量和类型

Appendix 2 Type variables and classification of community groups
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-2.pdf>

附录3 秤锤树生境概况

Appendix 3 Overview of *Sinojackia xylocarpa* habitat
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-3.pdf>

杨国栋, 季芯悦, 陈林, 钟育谦, 翟飞飞, 伊贤贵, 王贤荣. 基于SOM的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1268–1276.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018019>

附录1 自组织特征映射网络的基本架构
Appendix 1 Basic architecture and learning process of self-organizing map

附录2 群落分类群组的变量和类型
Appendix 2 Type variables and classification of community groups

类型 Type	所在样方优势树种 Dominant tree species	坡位 Position of slope	坡向 Aspect	坡度 Slope	土壤pH值 Soil pH value	土壤厚度 Soil thickness (cm)	海拔 Elevation (m)
I	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	上坡	东北	陡坡	7.27	52.33	205
II	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	下坡	西北	斜坡	6.85	48.11	156
III	黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	中坡	西南	微斜坡	7.57	40.28	158
IV	秤锤树 <i>Sinojackia xylocarpa</i>	上坡	南坡	缓斜坡	7.32	37.44	174
V	化香 <i>Platycarya strobilacea</i>	中坡	南坡	缓斜坡	7.17	28.51	117

附录3 秤锤树生境概况
Appendix 3 Overview of *Sinojackia xylocarpa* habitat

a. 秤锤树野生群落生境
Habitat of wild *Sinojackia xylocarpa*

b. 秤锤树野生群落夏季的地表径流
Surface runoff of wild *Sinojackia xylocarpa* in summer

c. 丛生灌木状的秤锤树
Bushy shrub *Sinojackia xylocarpa*