

引用格式:张兴航,张百平,王晶,等.神农架林区植被分布与地形的关系研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):482-493. [ Zhang X H, Zhang B P, Wang J, et al. Study on the relationship between terrain and distribution of the vegetation in Shennongjia Forestry District[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):482-493. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190553

# 神农架林区植被分布与地形的关系研究

张兴航<sup>1,2</sup>, 张百平<sup>1\*</sup>, 王晶<sup>1,2</sup>, 姚永慧<sup>1</sup>, 余付勤<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

## Study on the Relationship between Terrain and Distribution of the Vegetation in Shennongjia Forestry District

ZHANG Xinghang<sup>1,2</sup>, ZHANG Baiping<sup>1\*</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, YAO Yonghui<sup>1</sup>, YU Fuqin<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The Shennongjia Forestry District is one of the areas with the highest biodiversity in China. The complex topography exerts great influence on vegetation distribution in this region. This paper used the maximum entropy model (MaxEnt), digital elevation data, vegetation distribution map, and field-surveyed data, to study how the topographic characteristics affect local typical vegetation distributions at two scales, i.e., vegetation type and population levels. The relationship models between vegetation type and topographic factors, and between plant population and topographic factors were established respectively by quantifying the topographic ranges of vegetation types and plant species. Results show that: (1) the spatial distribution of different vegetation types was affected by different topographic factors. The distribution of coniferous forests was affected by elevation and coefficient of variation in elevation, the distribution of broad-leaved forests was controlled by elevation and aspect, and the distribution of shrubs was controlled by aspect and the slope of aspect. The factors affecting the distribution of grasses were various. (2) The elevation ranges of typical plant species were generally consistent with those of vegetation types. Specifically, 90% of coniferous forests were distributed at elevation between 1600 and 2600 m, and the typical populations of *Abies fargesii* and *Pinus armandii* were distributed at elevation of 1700~3200 m. 85% of the broad-leaved forests were distributed within the range of 1000 m to 2000 m in elevation, and the typical populations of *Cyclobalanopsis glauca*, *Carpinus turczaninowii* concentrated at elevation between 1000 to 2000 m. 95% of shrubs occurred at slope of aspect within 0~40 degrees, and the typical populations of *Rhododendron simsii* and *Rosaceae* mainly occurred at slope of aspect less than 40 degrees. The relationship models used for vegetation types and plant species were different. The relationship between vegetation types and topographic factors was fitted using Gauss model. While the relationship between typical species and topographic factors was relatively complex, and the distribution patterns of different species were even different. (3) Vegetation distribution showed a rather weak relationship with typical slope characteristic. This study provides a basic reference for vegetation protection, vegetation restoration, and vegetation management in the Shennongjia region.

收稿日期:2019-09-27;修回日期:2019-11-14.

基金项目:国家科技部基础资源调查专项(2017FY100900)。[ **Foundation item:** National Science and Technology Basic Resource Investigation Program, No.2017FY100900. ]

作者简介:张兴航(1992—),女,河北沙河人,博士生,主要从事山地GIS、山地生态环境研究。E-mail: jhj580724@163.com

通讯作者:张百平(1963—),男,河南博爱人,博士,研究员,主要从事自然地理与GIS应用研究。E-mail: zhangbp@reis.ac.cn

**Key words:** spatial distribution of vegetation; typical plant species; topographic factors; maximum entropy model; spatial analysis; Shennongjia; relationship models; Gaussian distribution

**\*Corresponding author:** ZHANG Baiping, E-mail: zhangbp@lreis.ac.cn

**摘要:**神农架林区是我国物种多样性最为丰富的地区之一,地形地貌复杂,对植被分布影响巨大。本文利用该地区2007年数字高程数据、2007年植被分布图以及2017年野外实地调查数据,基于最大熵模型和空间分析理论,从植被类型和种群两个角度研究该地区不同尺度植被空间分布的地形特征,分别量化植被类型和种群空间分布的地形范围,得到植被类型与地形因子关系模型、植被种群与地形因子关系模型。结果表明:①神农架林区影响植被空间分布的地形因子不同,其中影响针叶林分布的最重要的地形因子是高程和高程变异系数,影响阔叶林分布的是高程和坡向,影响灌丛分布的是坡向变率和坡向,影响草丛分布的较为分散;②典型植被种群分布的地形范围和植被类型的基本一致,其中90%针叶林分布在高程1600~2600 m间,典型种群巴山冷杉和华山松主要分布在高程1700~3200 m和1700~2200 m;85%的阔叶林分布在高程1000~2000 m间,典型种群青冈类和鹅耳枥主要分布在高程1200~2200 m间;95%的灌丛分布在坡向变率0~40°间,典型种群杜鹃和蔷薇主要分布在坡向变率小于40°的范围,但相应的关系模型存在差异,植被类型与地形因子为高斯模型,典型种群与地形因子关系模型相对复杂,不同种群的分布模式不同;③虽然坡度常作为数字地形的重要因子,但本文研究发现该地区坡度对植被类型和种群分布的影响不明显。研究结果可为神农架林区植被保护和恢复,以及植被规划和管理提供基础参考。

**关键词:** 植被分布;典型种群;地形因子;最大熵模型;空间分析;神农架;关系模型;高斯分布

## 1 引言

植被空间分布与一个地区的地形条件有直接关系,探究植被与地形因素的关系是自然地理学的主要研究内容之一<sup>[1]</sup>。地形是影响植被分布的关键因素,在相当程度上控制着地球表层物质与热量的地域再分配,制约着地表植被生存与变化<sup>[2-3]</sup>。利用数字高程模型(DEM)提取与分析地形因子<sup>[4-6]</sup>,结合植被分布特征做进一步研究,可以更好地反映研究区植被的地形变化特征。南北过渡带秦巴山地东部神农架林区是中国物种多样性最为丰富的地区之一,其地形结构复杂<sup>[7-8]</sup>,植被类型的区域差异和种群垂直分布规律明显,被认为是中国重要的天然植物基因库<sup>[9]</sup>。近年来为了经济和旅游发展,一些植被遭到严重破坏,保护和恢复该地区植被变得越来越重要。针对该区域植被类型和种群分布的地形规律研究,分析该地区植被类型和种群与地形因子的影响关系,可以相对精准地保护和修复这些植被相关的生态资源。

针对植被分布与地形之间的关系,国内已有大量相关的研究。马旭东等<sup>[10]</sup>基于梯度变化理论,对车八岭山地常绿阔叶林群落结构在微地形条件梯度上的分布变化特征进行分析,揭示了其对微地形变化的响应;张容等<sup>[11]</sup>采用数量分类和排序方法,定量分析了西双版纳森林植物群落分布格局与地形之间的内在联系;张梅玲等<sup>[12]</sup>利用空间叠加分析方法,分析了定南县岭北矿区植被覆盖度与地形因子的关系,揭示了高程和坡度是影响植被覆盖度最

重要的地形因子。赵鹏等<sup>[13]</sup>利用数量分类排序方法,分析了沙化高寒草地植物群落与地形的关系,发现坡度和坡向是沙化高寒草地物种分布的微地貌主导因素。李亚飞等<sup>[14]</sup>通过最大熵模型研究大香格里拉典型植被空间分布的地形特征。国际上也有很多植物群落与地形因子之间的关系研究。Moeslund等<sup>[15-16]</sup>认为地形因子是植被分布的潜在驱动因子,主要通过影响地表日照度、水文、地球化学等条件来影响植被分布。Sanders等<sup>[17]</sup>认为物种多样性的地形梯度变化更适合作为揭示空间变异的根本原因,可以作为研究物种多样性梯度的工具。Li等<sup>[18]</sup>利用阔叶林动态样地植物群落和物种组成数据,研究了微地形对植物群落分类和物种组成的影响,结果发现近27.11%的植物物种组成是由微地形因子引起的。目前,研究植物群落分布的关键环境影响因素的常用方法有主成分分析法、除趋势对应分析等<sup>[19-22]</sup>。

以上研究中地形因子主要局限于高程、坡度和坡向3方面的地形因子,较少对比分析其他地形因子(如坡度变率、坡向变率、高程变异系数、曲率、地形起伏度等),主要是认为高程、坡度和坡向是影响植被分布的主要地形因素,常常造成坡向变率和高程变异系数等地形因子被忽略。而本文在上述研究基础上,将地形因子分为微观地形因子和宏观地形因子<sup>[4]</sup>,更全面研究地形特征与植被空间分布的关系。本文引入最大熵模型,其广泛应用于地理学相关领域,已有大量相关的研究证明其精度较高,适合做贡献度分析<sup>[23-27]</sup>。而分析植被与地形因子的

关系,可以通过最大熵模型进行定量分析,获取每个地形因子对植被分布的贡献度<sup>[12]</sup>。

因此,本文以秦巴山地东部神农架林区为研究区,基于空间分析理论和最大熵模型,结合数字地形因子深入研究神农架典型植被类型和种群的分布规律,期望得到神农架林区植被与地形因子的量化关系模型,这对该区域植被的保护、规划和管理提供基础参考,对提升区域生态系统质量和稳定性具有重要意义。

## 2 研究区概况

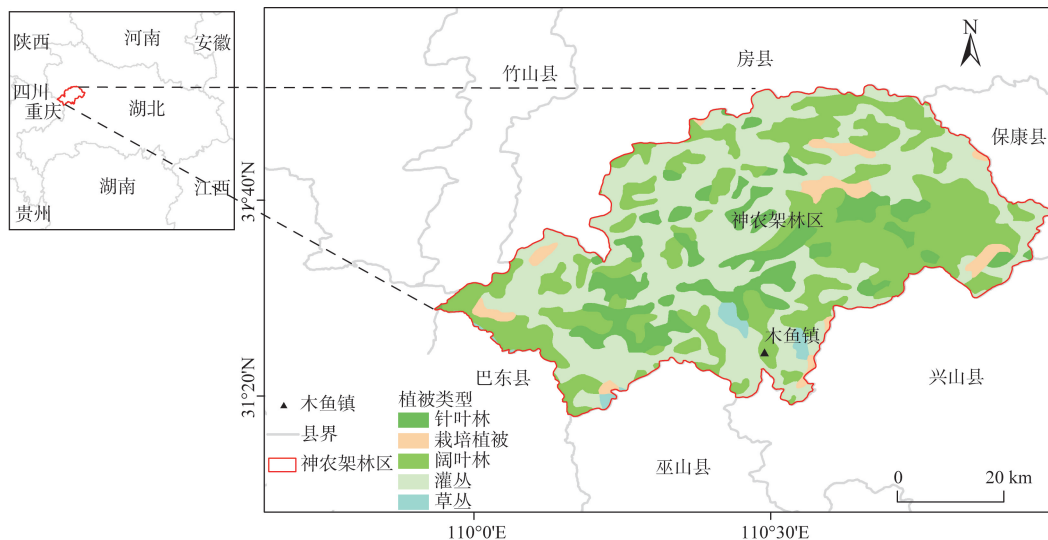
神农架林区位于 109° 59' E—110° 58' E, 31°15' N—31°57' N(图1),地处我国中部,湖北省的西部,与房县、兴山县、巴东县、竹山县和重庆市的巫溪县相邻。为我国地势第二阶梯向第三阶梯的过渡区域,是我国中北亚热带过渡地区,也是东北平原丘陵区向中部山地区的过渡地区。该地区面积约 3253 km<sup>2</sup>。气候受亚热带季风气候的强烈影响,降水丰沛,气温适中,年均温度为 11.0~12.2 °C,年降水量为 800~2500 mm,年平均降水量为 1219.93 mm,夏多冬少,4—10月占全年总降水量超过 70%,地势从南至北,从西至东减缓,最高峰神农顶的高程为 3105.4 m,最低高程 398 m<sup>[28]</sup>。地貌类型多样,地形复杂崎岖。气候垂直分布明显,地形景观多样,植被类型丰富,具有典型的垂直地带性<sup>[5]</sup>。该区主要植被类型有 5 种,分别为针叶林、阔叶林、灌丛、草丛和栽培植被,其中以阔叶林、灌丛和针叶林分布为主。

## 3 数据源与研究方法

### 3.1 数据源与数据处理

本文的数据主要包括神农架林区的植被类型数据和 DEM 数据。植被类型来自 2007 年 8 月出版的《中华人民共和国植被图(1:100 万)》<sup>[29]</sup>,时间上相对陈旧,但 2007 年中国植被图是经过大量专家的实地调查验证得出的结果,具有很高的精确率,也是近年植被分类研究参考的权威结果。另外,考虑近年来人类活动和理论上植物自然演替会造成某些植物物种变化,但对植被更大尺度上的植被类型影响微小。并且通过文献阅读,显示理论上树种的繁衍、迁徙和生态系统的演替需要几十至几百年的时间。综上所述,近 20 年的生长变化在本文研究的植被类型尺度上可以忽略不计。因此选择 2007 年中国植被图可以满足论文对植被类型与地形关系的研究。DEM 数据来自美国地质勘探局数据库(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),分辨率为 30 m,用于提取地形因子。

根据前期工作基础及对保护区植被分布状况的初步了解,为了更准确地获得神农架林区植被分布的地形特征,本次选取典型样点进行植物样方调查,调查时选择受人为破坏较少的地域进行详细调查,兼顾植被垂直分布,样点选择以植被破坏程度尽量小为标准。数据采集时间为 2017 年 10 月,分布在神农架西南方向(图2)、高程范围 1200~3100 m,是典型的森林群落,采样间隔设置垂直间隔约为 100 m,大小为 20 m×20 m,共获得 39 个调查样点植

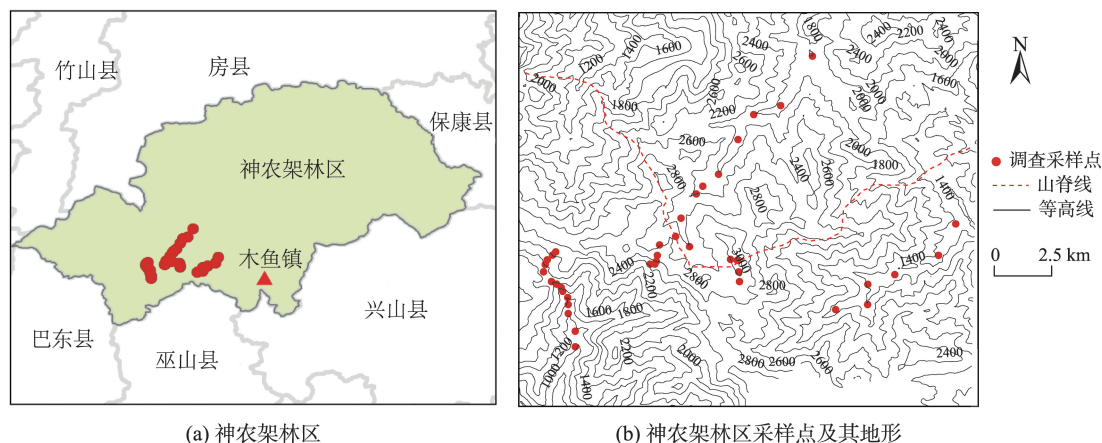


注:行政边界数据来源中国科学资源环境科学数据中心。

图1 神农架林区位置及2007年植被类型分布

Fig. 1 Location of Shennongjia Forestry District and vegetation type distribution in 2007





(a) 神农架林区

(b) 神农架林区采样点及其地形

图2 神农架林区采样点及其地形

Fig. 2 Sampling points and topography of Shennongjia Forestry District

物数据。数据记录森林样方内胸径大于2 cm的所有乔、灌木物种,调查指标包括:乔木层及灌木层的物种种类、个体数量、树高、冠幅、胸径(基径)、盖度;样地经纬度、高程高度、坡度、坡向、坡位。神农架植被调查植物株数为6032株,49科158属207种,其中南坡(含神农顶)42科82属139种3366株,北坡(含神农顶)41科76属142种2815株。

### 3.2 研究方法

本研究方法主要包括以下步骤:①收集和处理研究区植被类型(针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、栽培植被)和地形(DEM)数据,整理植被样方调查获取的植被群落数据;②提取地形因子(坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、高程变异系数、曲率、地形起伏度、地表粗糙度和地表切割深度),结合植被数据,基于MaxEnt模型计算地形因子对植被类型的贡献度;③根据贡献度选取上述5种植被分布分别较为重要的前2个地形因子,建立植被类型与地形因子的关系模型,并利用神农架地区植物群落实地调查数据进一步在小尺度上分析不同植被种群的潜在空间分布及与地形因子关系的定量模型。

#### 3.2.1 地形因子选取方法

本次研究地形因子分为微观因子和宏观因子,如图3所示<sup>[30]</sup>。DEM是地面高程直观的表达,更多的地形信息需通过数据模型算法进行特征提取。其中微观地形因子主要是利用空间向量差分进行计算;宏观地形因子主要采用移动分析窗口进行计算。各地形因子所代表的地理意义及特征:坡度是地表单元倾斜的程度;坡向为坡面法线在水平面上投影的方向,对于山地生态有着较大的作用<sup>[31-31]</sup>;坡

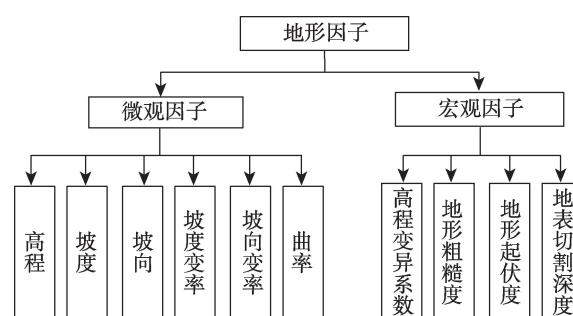


图3 神农架林区地形因子指标

Fig. 3 Topographic factor indicator in Shennongjia Forestry District

度变率和坡向变率是坡度的坡度和坡向的坡度<sup>[33]</sup>;高程变异系数指单元点标准差与平均高程比值,侧面反映地形的变化特征<sup>[28]</sup>;曲率可以反映地形扭曲变化程度,间接影响植被的生长<sup>[34]</sup>;地形起伏度是指定范围内栅格中高程值最大与最小差,主要是直观反映地形起伏特点<sup>[35]</sup>;地表粗糙度是地表邻域的曲面面积与其水平面上投影面积比值,可以反映地表侵蚀程度<sup>[36]</sup>;地表切割深度是地面某点邻域范围平均高程与其最小高程差值,可以反映地表被侵蚀切割的情况<sup>[37]</sup>。

(1)首先利用DEM数据,计算得到研究区的坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、曲率以及DEM中高程信息6个微观地形因子和高程变异系数、地表粗糙度、地形起伏度和地表切割深度4个宏观地形因子数据,得到各个栅格点的经纬度信息和地形因子数据。将植被类型图、地理坐标信息和10个地形因子的数据,转换为矩阵格式为下一步地形因子选取做数据准备。



(2)地形因子的选取使用MaxEnt最大熵模型,该方法是在最大熵理论的基础上提出的,最大熵理论是,在对一个随机事件概率分布进行预测时,预测必须满足全部已知条件,且对未知情况不做任何主观假设。在这种情况下,概率分布最均匀,预测的风险最小,这时概率分布的信息熵最大,所以人们称这种模型叫“最大熵模型”。通过每个格网反映各种环境因子作用下的植被适宜性,即该格网最适合该种植被生长的地形环境条件。与其他模型比较,该模型具有操作简易、计算速率高和预测结果好等优点<sup>[22,38]</sup>。

(3)将计算得到的地形因子和各植被类型进行MaxEnt计算,获取到对植被类型分布的各地形因子贡献度,根据贡献度来选取对植被类型影响较大的2个地形因子。

### 3.2.2 植被与地形因子的空间关系计算

基于地理空间分析方法,将每种植被类型与其对应贡献度最大的2个地形因子叠加,计算以上5种植被类型(针叶林、阔叶林、灌丛、草丛和栽培植被)在地理空间上对应的地形因子区间,同时获取该地形因子区间内该植被类型对应的面积统计量,根据这些数据生成相关统计图(将植被分布图与研究区高程、坡向、坡度、坡向变率、坡度变率、高程变异系数、曲率、地表粗糙度、地形起伏度、地表切割深度中贡献度最大的2个地形因子数据叠加,得到神农架林区植被分布的地形范围,并统计在不同地形因子范围内每种植被的栅格数,绘制折线图),进而分析这5种植被空间分布的数字地形特征。

同时,基于神农架地区植物群落实地调查数据,将典型种群与对应的贡献度较大的地形因子叠加,得到调查的典型种群分布地形范围,同时获取不同地形因子范围内典型植被种群的数量,并绘制相关统计图,得到植被种群分布的地形特征。

## 4 结果及分析

### 4.1 植被的地形因子贡献度分析

根据3.2节中介绍的MaxEnt方法,获取地形因子对各植被类型分布的贡献度,结果如图4所示。影响针叶林分布贡献较大的地形因子是高程和高程变异系数。影响阔叶林分布贡献较大的地形因子是高程和坡向。影响灌丛分布贡献较大的地形因子为坡向变率和坡向。影响草丛分布贡献较大

的地形因子是坡向和高程,但整体比较分散。影响栽培植被分布贡献较大的地形因子是高程和高程变异系数。从图4中各植被类型的地形因子贡献度可以看出坡度对植被分布的影响不明显。

### 4.2 植被类型空间分布的地形特征

图5(a)、(b)为针叶林主要分布在高程1600~2600 m(约占90%),其中约75%在高程段1900~2200 m范围内;通过高程变异系数关系,可以得到针叶林主要分布在高程变异系数为0~0.01的地区(约占96.5%)。

如图5(c)、(d)所示,阔叶林主要分布在高程1000~2000 m(约占85%),其中约65%在高程段1400~1900 m范围内;分析其与坡向的关系,可以得到,阔叶林主要分布在90°和270°附近,即东—西向。

如图5(e)、(f)所示,灌丛分布在坡向变率为0~80°之间,呈典型的偏正态分布。其中,坡度小于40°的范围,分布了该地区95%以上的灌丛。从坡向上看,0~360°的范围,以180°为分布数量最低的分界点,呈现向两侧逐渐递增趋势,在0/360°附近最多,即由南到北逐渐增多。

如图5(g)、(h)所示,草丛主要分布在坡向为90°和270°附近,但270°附近的数量整体高于90°附近;与高程的关系上看,主要分布在400~2700 m的范围内,呈典型的偏正态分布,其中90%以上的草丛分布在900~1900 m的范围。

如图5(i)、(j)所示,栽培植被分布在高程400~2200 m的范围内,集中分布在高程800~1200 m的高程范围内,占整个地区栽培植被面积的77.8%,平均高程为1200 m;从与高程变异系数关系上看,主要分布在高程变异系数小于0.04的区域内(约占95%),可以发现高程和高程变异系数相对较小的地区,更适合栽培该植被类型。

通过统计发现上述植被类型栅格统计数与其对应贡献度最高的2个地形因子的关系图呈高斯函数形状,因此本文选择高斯函数模拟植被类型和地形因子的定量关系:

$$y = a \times e^{\left[ -\frac{(x-b)^2}{2w} \right]} + c \quad (1)$$

式中: $y$ 代表神农架林区植被类型栅格数; $x$ 代表不同地形因子; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $w$ 代表高斯函数中的常量,地形因子不同,对应的常量也不同。

神农架林区植被类型与地形因子关系模型的

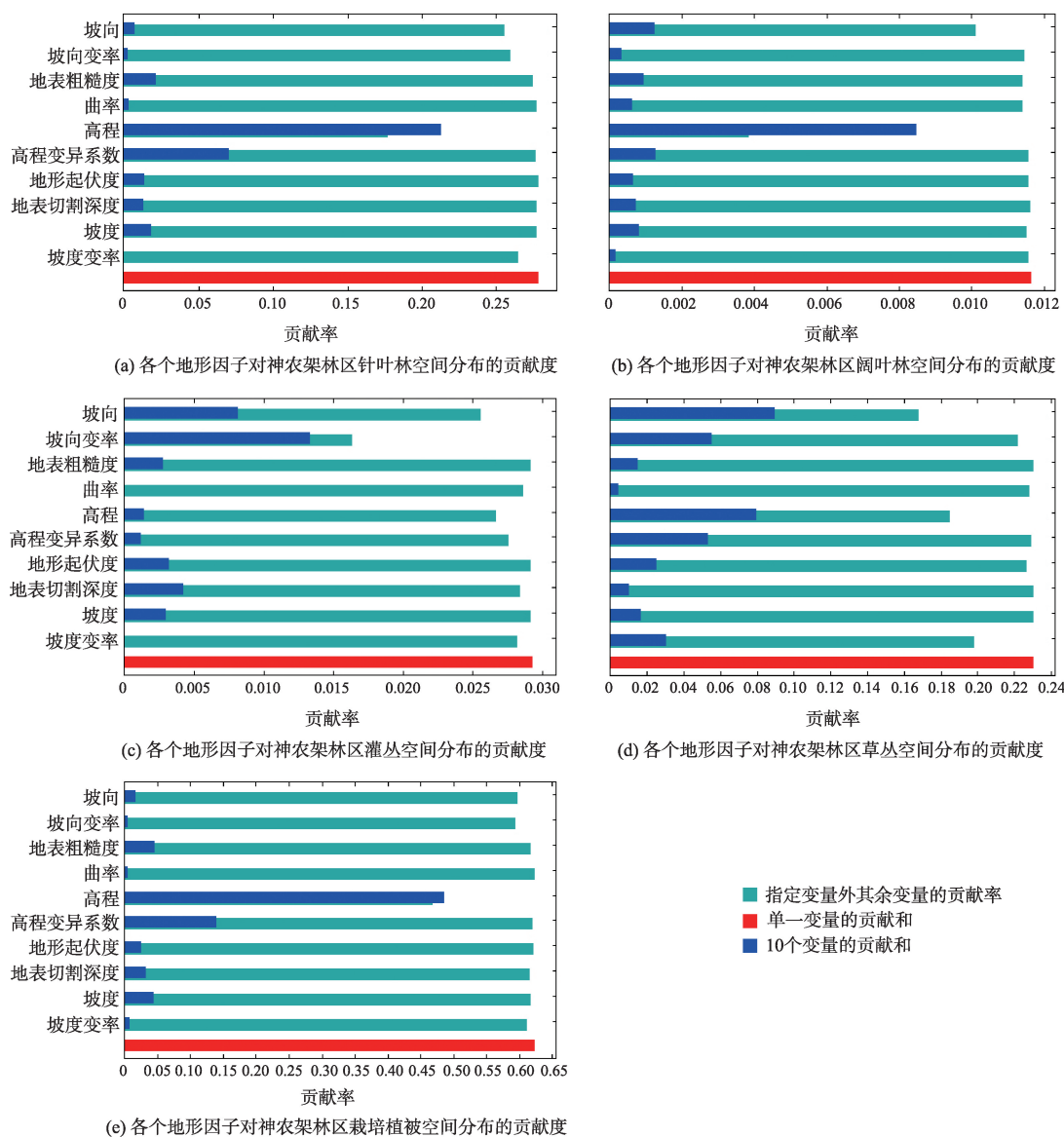


图 4 各个地形因子对神农架林区植被类型空间分布的贡献度

Fig. 4 Contribution rate of different topographic factors to spatial distribution of vegetation types in Shennongjia Forestry District

拟合参数见表 1, 其中灌丛与坡向关系模型为双峰高斯函数, 第 2 个峰所在的坡向范围数据比较分散, 模拟效果较差, 故表中没有该拟合参数。

$R^2$  是相关系数, 主要是检测函数的拟合精度。根据以上定量模型, 只有灌丛、草丛栅格数与坡向拟合的相关系数低于 0.6, 其他的均大于 0.6, 拟合精度较高。因此上述拟合函数可以作为神农架林区植被类型与地形因子的定量模型。

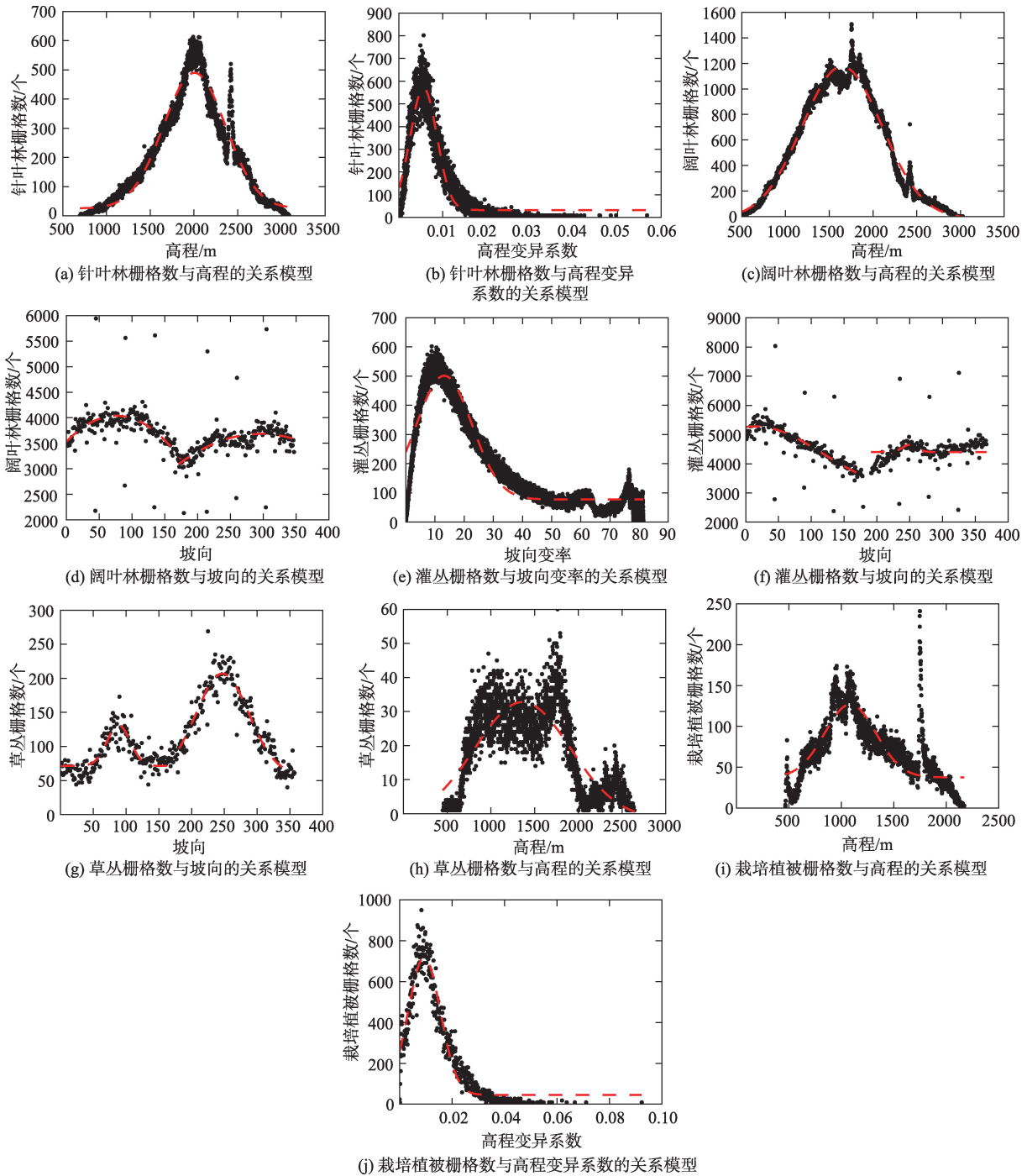
#### 4.3 植被种群潜在空间分布的地形特征

为了进一步在小尺度上定量界定不同植被种群的潜在空间分布和地形因子对其影响程度, 本次基于神农架地区植物群落实地调查数据, 将典型种

群与对应的贡献度较大的 2 个地形因子叠加, 得到调查典型种群分布地形范围, 并统计在不同地形因子范围内典型植被种群数量, 绘制统计图, 分析其空间分布的地形特征。

图 6 为调查范围内植被优势物种在南北坡沿高程分布特征。根据图 6 中的优势物种, 确定该地区针叶林的典型种群为巴山冷杉、华山松; 阔叶林的典型种群为青冈类、红桦和鹅耳枥; 灌丛的典型种群为杜鹃、茶藨子和蔷薇; 草丛和栽培植物受调查数据限制, 没有获取到该植被类型的典型种群, 本文不做分析。

图 7 所示为针叶林的典型植被种群的高程和高程变异系数分布特征。图 7(a) 为巴山冷杉的高程



注:红色虚线是通过高斯函数拟合得到的关系模型,即植被栅格数与地形因子的关系模型。

图5 神农架林区植被栅格数与地形因子的关系模型

Fig. 5 Relationship between grid number of vegetation and topographic factors in Shennongjia Forestry District

特征:在1700~3200 m的范围内,呈典型的线性递增分布模式,分布的高值在2700~3200 m之间。图7(b)为华山松的高程特征:在1200~3200 m的范围内,呈典型的开口向下的抛物线分布,分布的高程值在1700~2200 m之间。图7(c)为巴山冷杉的高程变异系数特征:在0~0.02的范围内,呈典型的

开口向下的抛物线,分布的高值在0.003~0.006之间;图7(d)为华山松的高程变异系数特征:在0~0.009的范围内,呈线性递增分布模式,分布的高值在0.006~0.009之间。图8所示为阔叶林的典型植被种群的高程和坡向分布特征。其中图8(a)红桦的高程特征为:分布在1200~3200 m,呈开口向上



表1 神农架林区植被类型与地形因子关系模型的拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of relationship model between vegetation types and topographic factors in Shennongjia Forestry District

| 关系模型         | 拟合参数        |          |              |          |                          |
|--------------|-------------|----------|--------------|----------|--------------------------|
|              | <i>a</i>    | <i>b</i> | <i>c</i>     | <i>w</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> /% |
| 针叶林与高程       | 464.5       | 2005.7   | 25.3         | 356.2    | 94.2                     |
| 针叶林与高程变异系数   | 537.3       | 0.0056   | 32.4         | 0.003    | 92.8                     |
| 阔叶林与高程       | 1189.9      | 1646.0   | -14.3        | 457.6    | 97.9                     |
| 阔叶林与坡向(第一个峰) | 3 054 761.1 | 76.0     | -3 050 725.7 | 4171.6   | 33.2                     |
| 阔叶林与坡向(第二个峰) | 989 602.2   | 304.5    | -985 918.5   | 3557.6   | 22.1                     |
| 灌丛与坡向变率      | 423.9       | 13.1     | 77.5         | 9.5      | 63.1                     |
| 灌丛与坡向(第一个峰)  | 2301.6      | 14.8     | 2980.4       | 100.5    | 62.6                     |
| 灌丛与坡向(第二个峰)  | —           | —        | —            | —        | —                        |
| 草丛与坡向(第一个峰)  | 59.8        | 88.7     | 71.3         | 17.6     | 66.9                     |
| 草丛与坡向(第二个峰)  | 148.5       | 246.9    | 58.4         | 40.2     | 89.1                     |
| 草丛与高程        | 34.4        | 1361.3   | -1.6         | 545.7    | 65.2                     |
| 栽培植被与高程      | 89.3        | 1085.8   | 37.6         | 244.4    | 62.4                     |
| 栽培植被与高程变异系数  | 672.0       | 0.0093   | 45.7         | 0.006    | 93.8                     |

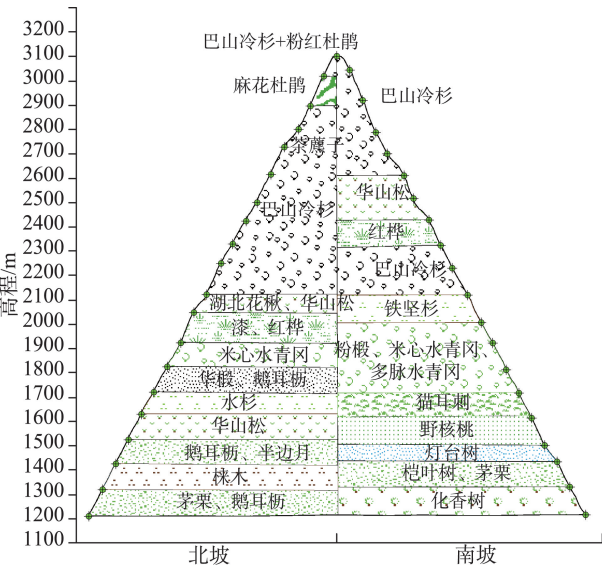


图6 神农架南北坡植被优势种群在高程上的分布

Fig. 6 Distribution of dominant vegetation populations on the north and south slopes of Shennongjia

的抛物线模式,各个高程段上整体分布较均匀;图8(b)青冈类的高程特征:在1200~3200 m范围内,呈典型的开口向上抛物线形状的分布特征,主要分布在1200~2200 m高程段上;图8(c)鹅耳枥的高程特征:只分布在1200~2200 m,呈逐渐增加的模式,2200 m以上不再出现该种群;图8(d)红桦的坡向特征为:各个坡向段都有分布,且从0到360°坡向中,呈现逐渐增加的模式;图8(e)青冈类的坡向特征:在0~360°范围内,呈典型的开口向下抛物线形状的

分布特征;图8(f)鹅耳枥的坡向特征:只分布在90~360°之间,在该范围内呈典型的开口向下抛物线形状的分布特征,0~90°范围内没有出现该典型种群。图9所示为灌丛的典型植被种群的坡向和坡向变率分布特征。其中杜鹃、茶藨子和蔷薇与坡向变率的关系模型各不同,但杜鹃和蔷薇主要分布在坡向变率0~40°范围内。图9(d)杜鹃的坡向特征为:各个坡向段都有分布,且从0到360°坡向中,呈现逐渐减少的模式;图9(e)、9(f)的茶藨子、蔷薇和坡向没有显著的关系模式。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本次利用最大熵模型提取了对神农架林区植被类型分布影响最大的2个主要地形因子,影响针叶林分布的是高程和高程变异系数;影响阔叶林分布的是高程和坡向;影响灌丛分布的是坡向变率和坡向;影响草丛分布的是坡向和高程;影响栽培植被分布的是高程和高程变异系数。在此基础上,明确了神农架林区各植被类型分布的地形范围,根据高斯函数拟合了神农架林区植被类型与地形因子的定量关系。

神农架林区不同植被类型与其对应实地调查的典型种群地形范围基本一致,地形范围分布主要有如下特征(由于草丛和栽培植物受调查范围限制,没

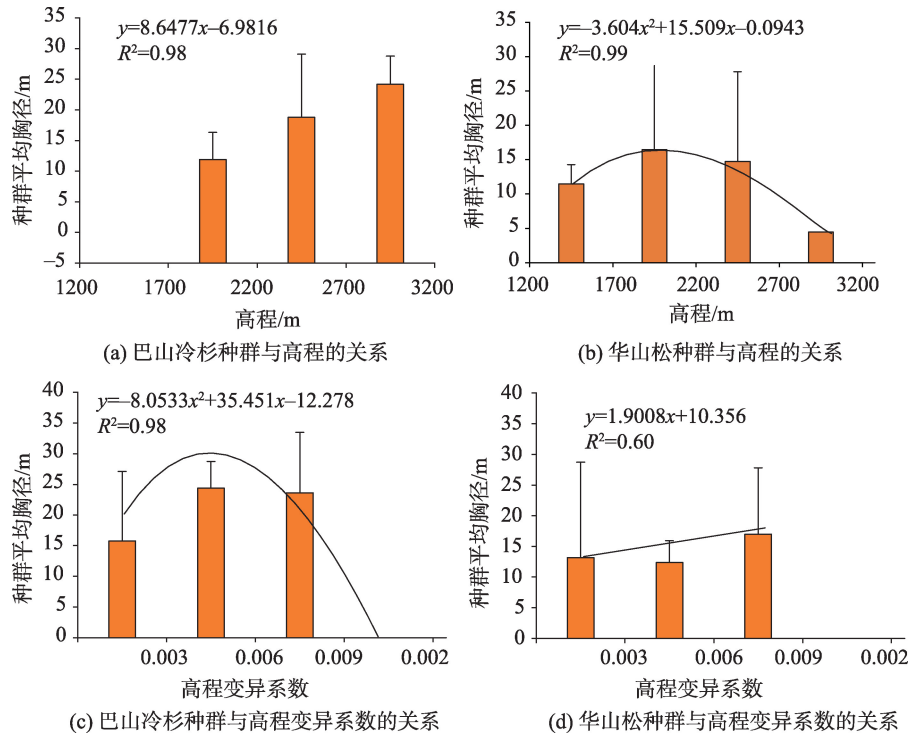


图7 神农架调查样地针叶林典型植被种群与高程和高程变异系数的关系

Fig. 7 Relationship between typical vegetation population and altitude and altitude variability coefficient of coniferous forest in Shennongjia

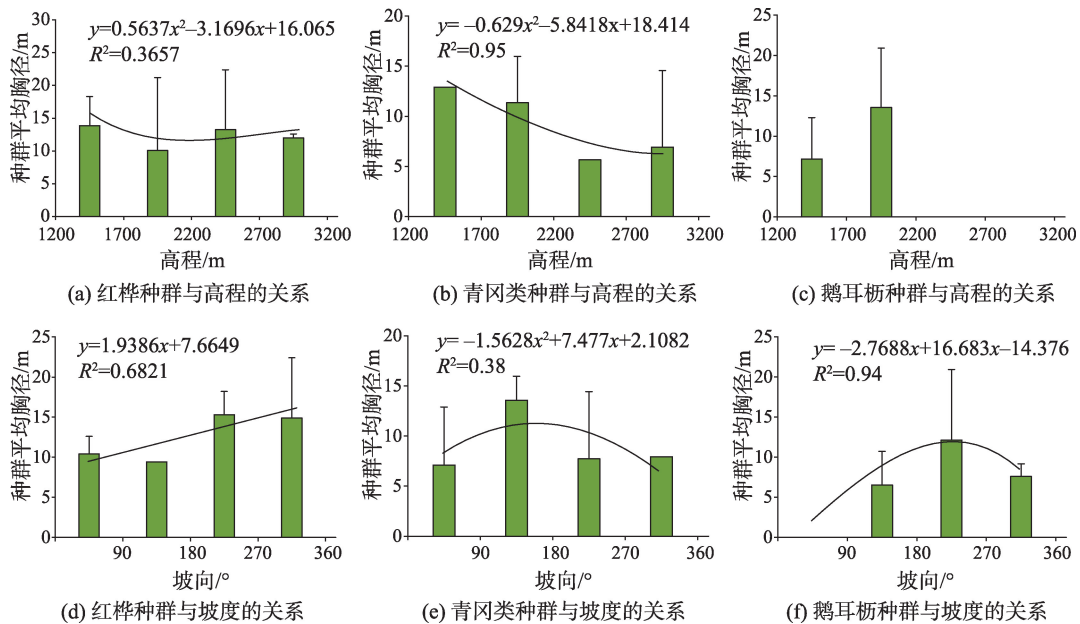


图8 神农架调查样地阔叶林典型植被种群与高程和坡向的关系

Fig. 8 Relationship between typical vegetation populations and elevation and slope direction of broad-leaved forest in Shennongjia

有获取到该植被类型的典型种群,因此不做分析):

(1)90%以上的针叶林分布在高程1600~2600 m的范围内,典型种群巴山冷杉和华山松主要分布在高程1700~3200 m和1700~2200 m范围内;

(2)85%以上的阔叶林分布在高程1000~2000 m的范围内,典型种群青冈类和鹅耳枥主要分布在1200~2200 m范围内;

(3)95%以上的灌丛分布在坡向变率0~40°的

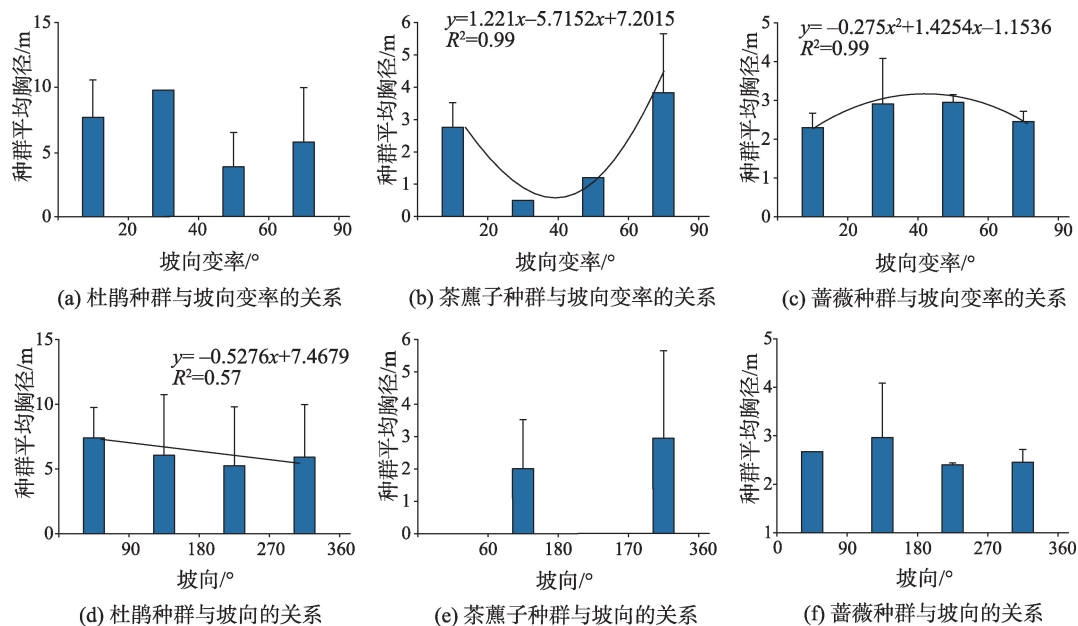


图9 神农架调查样地灌丛典型植被种群与坡向和坡向变率的关系

Fig. 9 Relationship between typical shrub vegetation population and slope and slope variability in Shennongjia

范围内,典型种群杜鹃和蔷薇主要分布在小于40°的范围。

## 5.2 讨论

研究结果中针叶林、阔叶林的高程分布范围与前人的研究及已有的数据资料显示基本一致<sup>[5]</sup>;栽培植被集中分布的高程800~1200 m,说明在低海拔的地区更适合,也更便于人们栽培该植被类型;草丛和灌丛分布主要受坡向和坡向变率影响,坡向会通过改变小气候而改变植被的空间分布情况,通常阴坡的植被覆盖度大于阳坡,在阴坡,草丛和灌丛往往和其它类型的植被呈现镶嵌分布<sup>[29]</sup>。另外根据野外实地调查数据与地形因子分布范围分析得出,本次研究神农架林区的典型种群巴山冷杉、华山松、青冈类和鹅耳枥的高程分布范围,以及典型种群杜鹃、蔷薇的坡度分布范围这一结果与廖明尧<sup>[7]</sup>对神农架地区自然资源综合调查报告的结果基本一致。

但植被类型和对应的典型种群与地形因子的关系模型存在差异,产生差异的主要原因之一是研究植被的尺度不同,环境对植被分布的影响依赖于研究的尺度。在较大的尺度上,气候和地形是控制植被分布的主导因素。而在较小尺度上,以往的土地利用类型和土壤性质等会影响植物物种的分布,而地形因子主要是间接影响植物种群的生长和分布。

本次研究大尺度上的植被类型与地形因子的定量关系模型均为高斯函数模型,且拟合精度较高。出现该模型结果主要是因为,尽管地形因子不是影响植被分布的直接生态因子,但是它通过影响这些直接生态因子空间组合对植被分布产生关键控制作用。对于山区植被,虽然地形不是影响植被的直接因子,但它对山区植被类型起到了决定性作用。因此植被分布与主导性地形因子关系中,往往存在植被的最佳生境,即高斯函数的顶端部分,随着生境条件降低,植被分布逐渐减弱,即高斯函数的两侧分布;而小尺度的典型种群与地形因子的定量关系主要为线性分布模式(一次函数和抛物线分布模式的二次函数),且不同种群的分布模式不同,没有统一的规律特征。出现这种模式结果的原因可能有,一是调查数据的有限性导致模型结果的异质性,二是不同植物种群对地形因子的依赖程度也不相同,如同为针叶林的马尾松和油松的生活习性也存在差异,因此从各植物种群着手研究与地形的关系,必然会出现不同的分布模式。

本文采用公布的植被类型图和实地植被调查数据,对该林区植被分布的地形因子进行研究,从数据层面上证明了神农架植被空间分布与地形因子之间存在特定的数学模型,为进一步的神农架植被空间分布机理分析奠定了基础。接下来的研究工作,结合长时间序列的光学遥感数据获得不同时期的植被类型图,考虑时间序列上影响植被分布的



地形因子是否会有差异。另外,本研究给出了不同植被分布和单地形因子的关系模型,而对于多地形因子如何组合产生各植被类型的最佳地形生境,基于目前的野外实地调查数据、植被类型图、地形图等地理信息数据还难以确定,需要进一步深入研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 伍光和,蔡运龙.综合自然地理学.第2版[M].北京:高等教育出版社,2004. [Wu G H, Cai Y L. Comprehensive physical geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. ]
- [2] 黄秉维.现代自然地理[M].北京:科学出版社,2004. [Huang B W. Modern physical geography[M]. Beijing: Science Press, 2004. ]
- [3] 程东亚,李旭东.喀斯特地区植被覆盖度变化及地形与人口效应研究[J].地球信息科学学报,2019,21(8):1227-1239. [Cheng D Y, Li X D. Vegetation coverage change in a karst area and effects of terrain and population[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(8):1227-1239. ]
- [4] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].北京:科学出版社,2010. [Tang G A, Li F Y, Liu X J. Digital elevation model course[M]. Beijing: Science Press, 2010. ]
- [5] Li C, Wang Q, Shi W, et al. Uncertainty modelling and analysis of volume calculations based on a regular grid digital elevation model (DEM)[J]. Computers & Geosciences, 2018,114(1):117-129.
- [6] 薛凯凯,熊礼阳,祝士杰,等.基于DEM的黄土峁峁提取及其地形特征分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1710-1720. [Xue K K, Xiong LY, Zhu S J, et al. Extraction of loess dissected saddle and its terrain analysis by using digital elevation models[J]. Journal of Geoinformation Science, 2018,20(12):1710-1720. ]
- [7] 宋朝枢.神农架自然保护区科学考察集[M].北京:中国林业出版社,1999. [Song C S. Scientific Investigation Collection of Shennongjia Nature Reserve[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. ]
- [8] 沈茂才.中国秦岭生物多样性的研究和保护[M].北京:科学出版社,2010. [Shen M C. Research and conservation of biodiversity in the Qinling mountains of China[M]. Beijing: Science Press, 2010. ]
- [9] 廖明尧.神农架地区自然资源综合调查报告[M].北京:中国林业出版社,2015. [Liao M Y. Integrated investigation report on the natural resources in the Shennongjia region [M]. Beijing: China Forestry Press, 2015. ]
- [10] 马旭东,张苏峻,苏志尧,等.车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征与微地形条件的关系[J].生态学报,2010,30(19):5151-5160. [Ma X D, Zhang S J, Su Z R, et al. Community structure in relation to microtopography in a montane evergreen broadleaved forest in Chebaling National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(19): 5151-5160. ]
- [11] 张容,董廷发,邓晓保,等.西双版纳20公顷样地热带森林植被数量分类与排序[J].生态学杂志,2018,37(2):347-352. [Zhang R, Dong T F, Deng X B, et al. Vegetation numerical classification and ordination of a 20-hectare tropical forest plot in Xishuangbanna, southwest Yunnan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(2):347-352. ]
- [12] 张梅玲,徐睿择.定南县岭北矿区植被覆盖与地形因子关系分析[J].地理信息世界,2018,25(4):50-55. [Zhang M L, Xu R Z. Analysis on the relationship between vegetation coverage and landform factors in Lingbei mining area, Dingnan county[J]. Geomatics World, 2018,25(4):50-55. ]
- [13] 赵鹏,屈建军,徐先英,等.长江源区沙化高寒草地植被群落特征及其与地形因子的关系[J].生态学报,2019,39(3):1030-1040. [Zhao P, Qu J J, Xu X Y, et al. Study on the characteristics of sandy alpine grasslands and its relationship between plant distribution and microtopography in the source regions of Yangtze River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(3):1030-1040. ]
- [14] 李亚飞,刘高焕.大香格里拉地区植被空间分布的环境特征[J].自然资源学报,2011,26(8):1353-1363. [Li Y F, Liu G H. Environmental characteristics of vegetation spatial distribution in grand Shangri-la Region[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(8):1353-1363. ]
- [15] Moeslund J E, Arge L, Bocher P K, et al. Topography as a driver of local terrestrial vascular plant diversity patterns [J]. Nordic Journal of Botany, 2013,31(2):129-144.
- [16] Moura M R, Fabricio V, Costa G C, et al. Disentangling the role of climate, topography and vegetation in species richness gradients[J]. Plos One, 2016,11(3):1-16.
- [17] Nathan J. Sanders, Carsten Rahbek. The patterns and causes of elevational diversity gradients[J]. Ecography, 2012,35(1):1-3.
- [18] Chang L W, Qiu S T, Yang G Z, et al. Changes of plant communities classification and species composition along the micro-topography at the Lienhuachih Forest dynamics plot in the central Taiwan[J]. Taiwanania, 2012,57(4): 359-371.
- [19] Bruelheide H, Dengler J, Purschke O, et al. Global trait-environment relationships of plant communities[J]. Nature ecology & evolution, 2018,2(12):1906-1917.
- [20] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2004. [Zhang J T. Numerical ecology[M]. Beijing: Science Press, 2004. ]

- [21] Lasaponara R. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from spot/vegetation ndvi temporal series[J]. *Ecological Modelling*, 2006,194(4):429-434.
- [22] Zhao H, Wang Q R, Fan W, et al. The relationship between secondary forest and environmental factors in the southern Taihang mountains[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):1-10.
- [23] 张东方,张琴,郭杰,等.基于MaxEnt模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究[J].*生态学报*,2017,37(15):5111-5120. [ Zhang D F, Zhang Q, Guo J, et al. Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the maxent model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(15):5111-5120. ]
- [24] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006,190(3):231-259.
- [25] Phillips S J, Miroslov Dudík. Modeling of species distributions with maxent: New extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008,31(2):161-175.
- [26] Park, N W. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3):937-949.
- [27] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills [J]. *Ecological Engineering*, 2013,51(1):83-87.
- [28] 丁军军.神农架森林土壤微生物沿海拔分布格局及形成机制[D].北京:清华大学,2016. [ Ding J J. Biogeographical patterns and mechanisms of forest soil microbial community along an elevation gradient in Shennongjia National Nature Reserve[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. ]
- [29] 中国科学院《中国植被图》编辑委员会.中华人民共和国植被图(1:100万)[M].北京:地质出版社,2007. [ Editorial committee of vegetation map of China, CAS. Vegetation map of the People's Republic of China (1:1 000 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. ]
- [30] 刘爱利.基于1:100万DEM的我国地形地貌特征研究[D].西安:西北大学,2004. [ Liu A L. A research on the geomorphologic characterization of China based on the 1: 1 000 000 DEM[D].Xian: Northwest University, 2004. ]
- [31] 井学辉,曹磊,郭仲军,等.阿尔泰山小东沟林区植被随地形分布规律[J].*应用与环境生物学报*,2015,21(3):152-158. [ Jing X H, Cao L, Guo Z J, et al. Distribution of vegetation types with topography in the Xiaodonggou forest region of Altai mountains, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015,21(3):152-158. ]
- [32] Aström M, Dynesius M, Hylander K, et al. Slope aspect modifies community responses to clear-cutting in boreal forests[J]. *Ecology*,2007,88(3):749-758.
- [33] Vaze J, Teng J, Spencer G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010,25(10):1086-1098.
- [34] 杨帆.基于DEM形态分析的湖南丘陵地形景观策略研究[D].长沙:湖南大学,2015. [ Yang F. Research on landscape strategy of Hunan Province hilly terrain based on morphological analysis in DEM[D]. Changsha: Hunan University, 2015. ]
- [35] Ramos-Scharrón, C. E, Thomaz E. Runoff development and soil erosion in a wet tropical montane setting under coffee cultivation[J]. *Land Degradation and Development*, 2016,28(3):936-945.
- [36] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practice sand slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017,166(1):147-156.
- [37] 王毅,郭跃.喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析——以贵州普定县为例[J].*长江流域资源与环境*,2018,27(1):157-167. [ Wang Y, Guo Y. Analysis of spatial correlation between vegetation coverage and terrain factors in Karst landform: Taking puding area in Guizhou for example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018,27(1):157-167. ]
- [38] 胡俊忠,张懿锂,于海彬.基于MaxEnt模型和GIS的青藏高原紫花针茅分布格局模拟[J].*应用生态学报*,2015,26(2):505-511. [ Hu J Z, Zhang Y L, Yu H B. Simulation of *stipa purpurea* distribution pattern on Tibetan plateau based on maxent model and GIS[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(2):505-511. ]