

用间接遥感方法探测大熊猫栖息地竹林分布

卞 萌^{1,2}, 汪铁军^{2,3}, 刘艳芳^{1,*}, 费 腾^{1,2}, Andrew K. Skidmore²

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079 ; 2. 荷兰国际地理信息科学与对地观测学院 (TC), 恩斯赫德, 荷兰 ;
3. 中国科学院动物研究所, 北京 100101)

摘要 竹子是野生大熊猫赖以生存的唯一食物。探测大熊猫栖息地内的竹林分布状况, 有助于深入了解大熊猫及其栖息地的空间分布格局与特点, 并为评估其栖息地适宜性、破碎化程度和生态承载力提供科学依据。由于大熊猫的主食竹大都生长于林下, 直接通过遥感影像解译的方法很难实现对其分布密度的探测。以佛坪自然保护区的两大优势竹种——巴山木竹和秦岭箭竹为例, 在运用遥感和 GIS 方法获取空间连续的环境变量时, 引入了林上和林下的光照条件, 通过分析不同竹种与各环境要素之间的关系, 建立竹子密度的预测模型, 最后在 GIS 空间分析技术的支持下实现了对林下竹子密度的绘制。研究结果显示 : 该方法能够比较准确地预测出林下竹子的分布状态, 对两种竹子的密度预测精度均可达到 70% 以上。

关键词 林下植被 巴山木竹 秦岭箭竹 大熊猫栖息地 遥感 地理信息系统 光照条件

文章编号 : 1000-0933 (2007) 11-4824-08 中图分类号 : Q143 文献标识码 : A

Detection of understory bamboo in giant panda habitats using an indirect remote sensing approach

BIAN Meng^{1,2}, WANG Tie-Jun^{2,3}, LIU Yan-Fang^{1,*}, FEI Teng^{1,2}, Andrew K. Skidmore²

1 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede 7500 AA, the Netherlands
3 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (11) 4824 ~ 4831.

Abstract : The bamboo is the exclusive food of the wild giant pandas. Detection of the bamboo forest in giant panda habitat will help scientists further understand the spatial distribution pattern of giant pandas and their habitats. Moreover, it provides crucial scientific evidence for estimating habitat suitability, the level of habitat fragmentation as well as its ecological carrying capacity for pandas. However, it is a big challenge to map bamboo forests using direct remote sensing approach as most of them grow underneath the forest canopy. In this study, two dominant bamboo species, *Bashania fargesii* and *Fargesia qinlingensis* in Foping panda reserve were investigated. While remote sensing and GIS techniques were used to map spatial continuous environmental variables, for the first time, the overstory and understory light climate was introduced as a potential factor for explaining bamboo distribution. The model for predicting undestory bamboo density was developed based on statistical analyses between different bamboo species and its relevant environmental factors. Finally, the bamboo

基金项目 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2006CB701303)

收稿日期 2006-10-13 ; **修订日期** 2007-08-28

作者简介 卞萌 (1981 ~), 女, 山东人, 博士生, 主要从事遥感和地理信息系统应用研究. E-mail : bian@ itc. nl

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail : yfliu610@163. com

致谢 : 感谢荷兰国际地理信息科学与对地观测学院 (TC) 为作者在荷兰硕士学习期间所提供的奖学金, 感谢世界自然基金会荷兰分会 (WWF Netherlands) 为本研究的野外调查所提供的资金支持, 感谢佛坪自然保护区党高弟先生外业调查的大力协助。

Foundation item The project was financially supported by the National 973 Program (No. 2006CB701303)

Received date 2006-10-13 ; **Accepted date** 2007-08-28

Biography BIAN Meng, Ph. D. candidate, mainly engaged in application of remote sensing and GIS in biodiversity conservation. E-mail : bian@ itc. nl

density map was produced with the support of GIS spatial analysis. The results suggest that satisfactory mapping accuracy of understory bamboo detection can be achieved by using an indirect remote sensing approach. The overall accuracy of both bamboo species was 78% .

Key Words :understory ;*Bashania fargesii* ;*Fargesia qinlingensis* ;giant panda habitat ;remote sensing ;GIS ;light climate

竹子是野生大熊猫赖以生存的唯一食物,也是构成大熊猫适宜生境的关键性因子^[1]。大量的研究表明,竹种的构成、竹林的分布范围、以及竹林的生长状况,包括其密度、年龄结构、出笋率等均可对大熊猫的分布、移动和取食造成影响^[1~4]。探知大熊猫主食竹的分布和丰富程度,不仅有助于了解当今大熊猫的空间分布格局和栖息地特征,而且也便于正确划分其实际栖息地和潜在栖息地,同时也可为进一步估算主食竹的总体生物量水平从而准确评估大熊猫栖息地的生态承载力提供科学依据,对加强大熊猫这一“旗舰物种”及其栖息地的保护意义重大。

长期以来,对大熊猫分布区竹类的研究多以微观和野外实地样方调查为主。研究领域主要集中在大熊猫主食竹的分类与分布、生态生物学特性、生理生化特征、以及更新复壮等方面^[5~9]。由于大熊猫栖息地山大沟深,且地形复杂,传统的基于点上的地面调查方法不仅耗时、耗力、而且耗费资金,这些均给大熊猫主食竹的资源分布和生物量调查带来了极大困难。不同景观尺度详细竹类信息的缺乏,同时也给大熊猫栖息地的评价带来了巨大挑战。传统上,在大熊猫的主要分布区内,科学家们多简单地采用海拔和植被覆盖(有森林和无森林)作为判断竹类资源分布状况的主要标准^[10~13]。有研究报道,由此而导致的过高或过低评价大熊猫适宜栖息地在所难免^[14]。

近年来,随着卫星遥感技术作为一种新的大范围资源监测手段的兴起和发展,许多研究者也希望能够通过遥感来实现对竹林分布的大面积探测^[15,16]。然而,大熊猫的主食竹多生长于森林的下层,由于林冠层的遮蔽作用,直接利用传统遥感技术来探测竹子的分布和生长状况比较困难。有研究利用先进的神经网络分类技术来判别有竹区和无竹区,取得了相对满意的分类效果^[7]。但该方法缺乏对竹类详细信息的探究,且对技术和调查设备要求较高,大范围推广难度较大。鉴于此,本研究提出了一种间接利用遥感技术来探测林下层竹林分布和密度的方法。这一方法主要是基于对不同竹种及其生长小生境的关系的分析探讨,在找出影响不同竹类分布的主要环境因子后,确定各因子的权重,然后利用遥感和地理信息系统(GIS)技术手段探测并绘制出这些主要的环境因子。在此基础上,根据竹林生长和这些重要因子之间的关系模型,就可以较为准确地预测林下竹林的分布和相对密度。针对竹子主要生长在林下的这一特点,在本研究中,除了对传统的地形因素如海拔、坡度和坡向等进行了较为细致的探究以外,还创新地引入林上以及林下的光照条件作为一种潜在的、可能影响竹子生长和分布的环境因子,并对其在竹类资源评价中所起的作用进行了分析和探讨。

1 研究地区概况

研究地区选择在位于陕西秦岭中段南坡的佛坪国家级自然保护区境内。该保护区成立于1978年,是我国为数不多的几个未经大规模森林采伐,且森林生态系统保存相对完整的大熊猫栖息地之一。地理坐标:107°40′ ~ 107°55′ E,33°32′ ~ 33°45′ N。保护区总面积294km²,最低点海拔980m,最高点海拔2904m,相对高差1924m。本区地处北亚热带与暖温带的过渡地带,区内植被以森林为主,表现出显著的垂直分布格局,自下而上依次为落叶阔叶林、针阔叶混交林、针叶林,海拔2600m以上分布着斑块状亚高山灌丛和草甸^[8]。林下广布的巴山木竹(*Bashania fargesii*)和秦岭箭竹(*Fargesia qinlingensis*)是该区大熊猫的主要食物来源,海拔2000m左右为其大致的地理分界线,但两种竹类的分布在局部地区有一定程度的重叠^[9]。

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

2.1.1 卫星遥感影像

经过几何和大气校正后的研究地区美国陆地资源卫星 Landsat 5 TM (Thematic Mapper) 全波段影像两幅 ,

坐标和投影系统采用 WGS84 UTM 48N。影像空间分辨率 30m×30m,分别获取于 2000 年 7 月 30 日 (夏季)和 2002 年 1 月 20 日 (冬季)。

2.1.2 数字高程模型 (DEM)

分辨率为 30m×30m 的佛坪保护区 DEM 一幅。主要用于：() 生成保护区的海拔、坡度、坡向等地形因素图层；() 与太阳辐射模型 (Solar Radiation Model) 结合获取整个研究区的林上层太阳辐射强度图；() 结合经验公式获取研究地区的温度垂直分布图。

2.1.3 二手资料

采用全国第 3 次大熊猫调查中佛坪保护区范围内的 297 个与竹子信息有关的样方数据作为校验数据,其中巴山木竹样方 120 个,秦岭箭竹样方 177 个,用以对预测出的竹林分布图进行精度检验和评价。

2.2 研究方法

2.2.1 野外取样调查方法

2005 年 7 月,采用成层随机采样和随机线性交叉采样法^[10],对研究区内的两大竹种进行了两次独立采样,共调查了 150 个样方 (6 个巴山木竹,28 个秦岭箭竹,36 个无竹样方)。植被样方设计面积为 20m×20m,邻近样方之间至少保持 50~100m 的海拔变化。植被样方中所调查的内容包括 GPS 定位点、海拔、坡度、坡向、坡位、林冠层树种组成、植被类型、林冠郁闭度和竹子的总体盖度。此外,在大的植被样方中固定设计 5 个竹子小样方,分别位于样方的四角和中心位置。竹子小样方面积分别为 2m×2m (巴山木竹)和 1m×1m (秦岭箭竹),调查内容包括竹种、株数、高度、基径,以及大熊猫的活动等信息。与此同时,为了获得较为准确的林下光强,使用带有鱼镜头的照相机对每个植被样方的林上层覆盖状况进行了拍摄。鱼镜头是一种接近 180°的超广角镜头,可以用于由下方向上方的拍摄以获取半球面林冠影像,这种影像可记录当时整个林上层的疏密度和孔隙分布^[1,22]。拍摄的照片经过相应的影像处理软件 Gap Light Analyzer (GLA)^[3]的分析计算后,便可以获知林上连续的郁闭度及其消光能力。

2.2.2 林上光强的计算和绘制

林上层的光照条件由太阳辐射模型计算得出。太阳辐射模型可以根据地形的起伏变化 (不同纬度、海拔以及坡向等)得到地球上任一点在一段时间内的太阳辐射总和。利用这一模型,以研究区的 DEM 为基础,可以计算出在竹子生长期,整个研究区内林上光照辐射总和或日平均辐射量。由于巴山木竹和秦岭箭竹具有不同的生长期,巴山木竹的主要生长时段为 4 月到 8 月份,而秦岭箭竹约从 5 月份开始出笋,到 10 月初才基本停止生长,所以需要分别计算出两种目标竹种在各自生长期内的林上光照辐射。本研究中采用由澳大利亚新英格兰大学环境科学与自然资源管理系开发的 ArcGIS 插件——太阳辐射模型 (Solar Radiation Model),来计算太阳辐射量^[4]。以计算巴山木竹生长期内的林上光照辐射为例,模型的主要参数设置为北纬 33°,计算起止日为 4~8 月,迭代时间间隔为 30min。经过该模型计算出的全区巴山木竹生长期内林上日平均光照辐射见图 1。同样的方法也可用于计算秦岭箭竹的林上光强。

2.2.3 林下光强的计算和绘制

林上层植被的遮盖作用,使得林下层得到的太阳辐射有所削弱。野外采样时使用带有鱼镜头拍摄得到的上层林冠照片,见图 2。这些照片经 GLA 软件处理后可计算出上层林冠郁闭度及不同林冠郁闭度相应的消光系数,同时得出两者之间关系的经验公式。林冠消光系数 (Extinction Coefficient)反映了林冠阻止林上光入射到林冠下层的能力。林冠郁闭度越大,消光能力越强,消光系数也就越大。根据该公式,基于研究区林上太阳辐射总量和林上植被郁闭度,可以计算出地面上每一点的林下光强。由于佛坪保护区森林覆盖茂密,仅仅依靠传统的植被指数如 NDVI 等很难分辨出林冠层郁闭度的大小,故引入了森林林冠密度预测模型 (Forest Canopy Density Model)^[5]来分析处理遥感影像,用以探测研究区内的林上层郁闭度,与消光系数结合便可进一步得到林下光照条件图。森林林冠密度模型由增强性植被指数 AVI (Advanced Vegetation Index)、土壤指数 BI (Soil Index)、温度指数 TI (Thermal Index)、阴影指数 (Forest Shadow Index) 4 个指数构成,可以从多个

因素综合分析森林郁闭度的大小。这 4 个参照指数的整合由林冠密度模型派生的处理软件 FCD Mapper (Forest Canopy Density Mapper) 来实现。

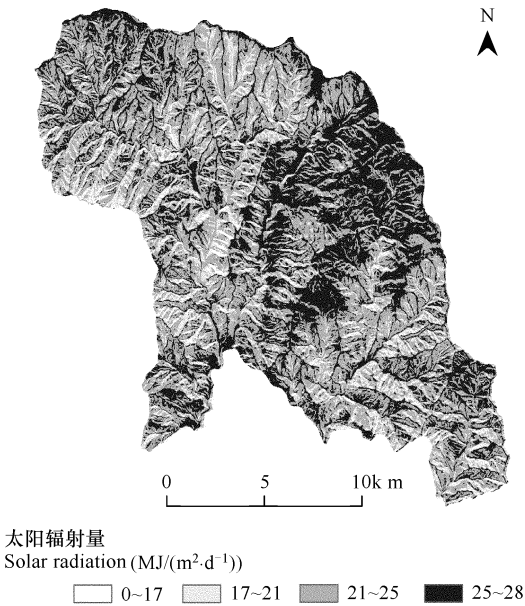


图 1 巴山木竹生长期内的林上层太阳辐射
Fig. 1 Overstory light climate for *B. fargesii*

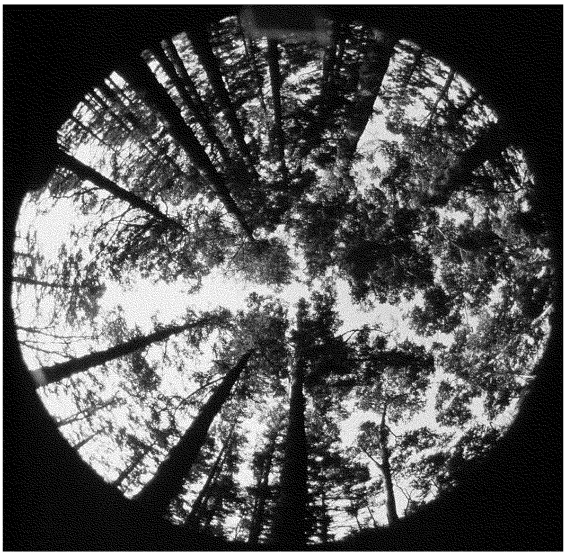


图 2 鱼镜头拍摄的半球面林冠照片
Fig. 2 Hemispherical photograph of forest canopy

2.2.4 温度的计算和绘制

研究区地处秦岭深处,地形复杂,要想获得覆盖全区且连续的实地气象观测记录困难较大。考虑到山区的气温变化主要受海拔变化的影响,本研究采用唐志尧等人于 2004 年在研究秦岭植物群落的环境梯度格局时,通过在太白山南北坡设置连续小型气象观测仪,所得出的秦岭南坡年平均温度和海拔高度关系的模型 ($R^2 = 0.92, p < 0.001$) 为基础^[6],见公式 1,在 DEM 的支持下,模拟并绘制了佛坪保护区全区各点年均温度图:

$$MAT = -0.0037 \times ALT + 14.5 \tag{1}$$

式中, MAT 为年平均气温, ALT 为海拔高度。

2.2.5 统计分析

在建立竹林密度模型之前,需要分析哪些环境因子与竹林密度分布显著相关。在本研究中,由于巴山木竹和秦岭箭竹在生物学特性和分布高度上的不同,其统计分析和密度模型也分别建立。基于实地采集的海拔、坡度、坡向、坡位等地形因子数据,加上模拟出的温度和计算出来的各样方的林上、林下光强,利用 SYSTAT 数理统计软件,首先对竹林密度和这些因素之间的关系逐一进行统计分析,对非正态分布的数据使用非参数秩和检验 (Kruskal-Wallis Test)。根据统计分析的结果,将与竹林密度显著相关的环境因子作为自变量,竹子密度作为因变量,建立回归方程。由于自变量并不都是连续变量,故选择广义线性模型 (General Linear Model) 作为竹林密度的预测模型。利用这一关系模型,在绘制出各个重要影响因子的基础上,就可以在 GIS 的空间分析环境下绘制出大尺度上的林下竹子密度分布图。

3 结果与分析

3.1 巴山木竹密度分布图

数据的统计分析结果显示,巴山木竹林的密度分布与坡度、坡向、以及林上光照强度均呈现一定的显著相关关系 ($p < 0.05$)。采用逐步回归法 (stepwise Regression),经过模型的优化选择后,得到能够最佳解释巴山

木竹分布的广义线性模型 (General Linear Model)。该模型可以解释约 60% 的木竹分布状况 ($R^2 = 0.591$, $p < 0.05$), 具体见公式 2:

$$Y = -0.181 + 0.00126 \times SR - 0.043 \times Slope + ASP$$

②

式中, Y 为巴山木竹密度 (株/ m^2), SR 为太阳辐射量 (MJ/m^2); $Slope$ 为坡度, ASP 为各个坡向的对应系数 (见表 1)。

表 1 广义线性模型中的坡向对应系数
Table 1 Coefficients for aspect in general linear model

坡向 ASP	东 E	北 N	东北 NE	无坡向 No asp	西北 NW	南 S	东南 SE	西南 SW	西 W
系数 Coefficient	2.658	-0.421	0.038	-0.919	-0.250	1.506	0.897	1.025	0

根据巴山木竹主要分布在海拔 2000m 以下的生长习性, 首先以海拔为尺度选择了巴山木竹的潜在生长区。然后应用上面的关系模型, 最终得到巴山木竹的密度分布图, 见图 3。

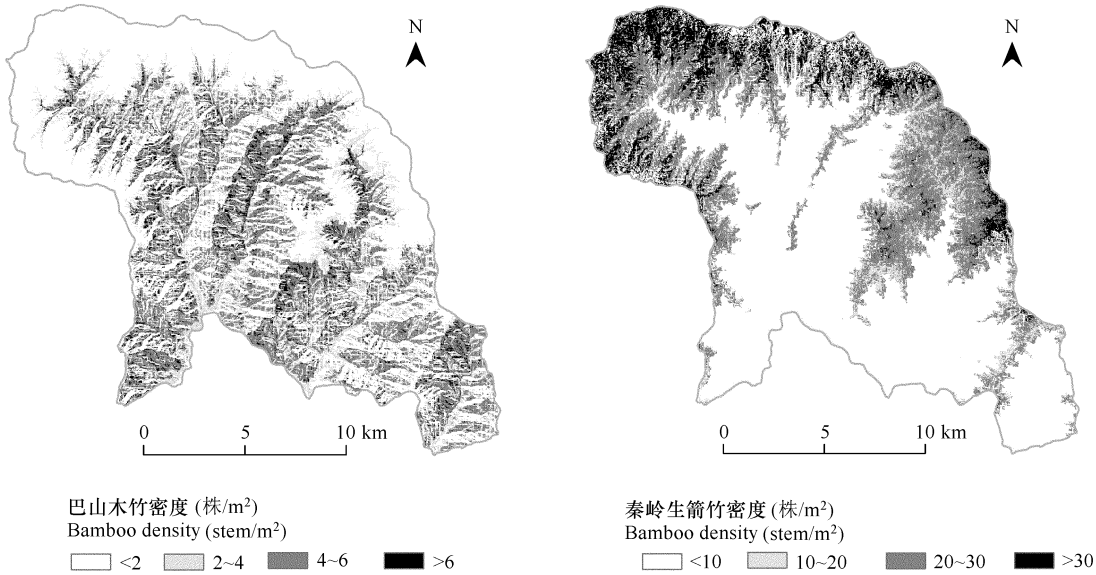


图 3 预测出的佛坪保护区巴山木竹密度图 (左图) 和秦岭箭竹密度分布图 (右图)
Fig. 3 Predicted bamboo density map for *B. fargesii* (left) and *F. qinlingensis* (right) in Foping NR

3.2 秦岭箭竹密度分布图

采用同样的方法, 可以得到解释秦岭箭竹分布的最佳关系模型。这一模型可以通过 3 个与秦岭箭竹分布显著相关的环境因子 —— 海拔、坡度和林下光强, 解释约 80% 的林下秦岭箭竹林的密度分布 ($R^2 = 0.815$, $p < 0.05$), 具体见公式 3, 预测的秦岭箭竹密度分布见图 3:

$$Y = -137.04 + 0.033 \times ELE + 12.872 \times \ln(Solartrans) + Slope$$

③

式中, Y 为秦岭箭竹密度 (株/ m^2), ELE 为海拔高度, $Solartrans$ 为林下光强 (MJ/m^2), $Slope$ 为分类坡度系数 (见表 2)。

3.3 精度检验

研究采用全国第 3 次大熊猫调查独立数据组作为绘制出的竹林密度图的检验数据。该调查的佛坪保护区部分完成于 2000 ~ 2001 年之间。297 检验数据是在研究区域的范围内随机抽取的, 其中巴山木竹

表 2 广义线性模型中分类坡度对应的系数
Table 2 Coefficients for slope in general linear model

分类坡度 Slope (°)	<20	20 ~ 40	>40
系数 Coefficient	-4.871	0	-14.633

检验样方 120 个,秦岭箭竹检验样方 177 个。由于检验数据中将竹林分布人为划分为 0 ~ 24% , 25% ~ 49% , 50% ~ 74% , 75% ~ 100% 4 个盖度等级,所以应先将研究中预测出的竹林密度转换成相应的竹林盖度后方可进行比较。根据本研究中的野外采样数据,发现巴山木竹和秦岭箭竹两种竹种的竹林密度和盖度之间均存在非常显著的相关性,相关系数都在 0.9 以上,竹林密度和盖度可以相互转化。具体见转化公式 4 和公式 5 :

巴山木竹 (*Bashania fargesii*)
$$Y = 0.1219X + 0.065$$
4)

秦岭箭竹 (*Fargesia qinlingensis*)
$$Y = 0.0223X + 0.0024$$
5)

式中, Y 为竹林盖度 (%), X 为竹林密度 (株/ m^2)。

依照以上的竹子密度与盖度之间的转化公式,即可分别得到巴山木竹和秦岭箭竹的预测竹林盖度,然后与检验数据中的竹林盖度进行分析比较,检验结果见表 3 和表 4。

表 3 实测对应预测的巴山木竹密度误差矩阵

Table 3 Error matrix for observed versus predicted *Bashania fargesii* bamboo density

预测木竹盖度 Predicted class (%)	实测木竹盖度 Observed class (%)				总计 Total
	0 ~ 24	25 ~ 49	50 ~ 74	75 ~ 100	
0 ~ 24	40	8	0	0	48
25 ~ 49	0	10	8	0	18
50 ~ 74	0	0	23	1	24
75 ~ 100	0	0	9	21	30
总计 Total	40	18	40	22	120

表 4 实测对应预测的秦岭箭竹密度误差矩阵

Table 4 Error matrix for observed versus predicted *Fargesia qinlingensis* bamboo density

预测箭竹盖度 Predicted class (%)	实测箭竹盖度 Observed class (%)				总计 Total
	0 ~ 24	25 ~ 49	50 ~ 74	75 ~ 100	
0 ~ 24	31	12	0	0	43
25 ~ 49	0	53	22	0	75
50 ~ 74	0	0	32	4	36
75 ~ 100	0	0	0	23	23
总计 Total	31	65	54	27	177

巴山木竹密度预测的误差矩阵显示,在 120 个观测值中,有 94 个样点的预测值是准确的,总体精度为 78.3% , Kappa 检验值为 0.702 秦岭箭竹预测的误差矩阵显示,在 177 个观测值中,有 139 个样点的预测值是准确的,总体精度为 78.5% , Kappa 检验值为 0.704。结果证明这样的预测精度是可以接受的,也是比较满意的。

4 讨论与结论

本研究尝试了一种新的探测林下竹子分布及其丰富度的方法——间接遥感法,即在运用遥感和 GIS 方法获取空间连续的环境因子基础上,通过分析不同竹种与各环境要素之间的关系,建立竹子密度的预测模型,最后在 GIS 空间分析技术的支持下实现对林下竹子密度的绘制。研究结果显示,应用该方法对两类目标竹种密度的探测精度均达到了 78% ,表明利用间接遥感法探测大熊猫主食竹分布的可行性。与传统的小范围实地调查方法相比,间接遥感法不仅节省人力、物力和财力,还可以有效地实现大景观、大尺度的竹林潜在生长区的探测。与其它的遥感影像分类方法相比,间接遥感法对影像的分析利用不再受季节的限制,不局限于冬季的遥感影像,也不仅限于对四季常绿竹种的探测,可以高效地利用遥感影像数据获取丰富的林下竹林资源信息。同时,这一方法也可以用于对其它林冠下层植被信息的探测,尤其对于那些与上层林生长状况关系密切的植被,光敏感性植被更为有效。

在对地理环境因子的分析中,本研究详细分析了海拔、坡度、坡向等对于竹子生长的影响,发现某些地形

因素与竹子分布关系比较显著。通过比较两种竹子的密度预测模型,可以看出最优预测巴山木竹密度的因素组合是坡度、坡向和林上光强。而最优预测秦岭箭竹密度的为海拔、坡度和林下光强。海拔没有被纳入巴山木竹的密度预测模型中,表明虽然两种竹子的空间分布具有沿垂直高度变化和交叠的特点,但在巴山木竹的适生区内(100~1900m),海拔可能并不是影响巴山木竹密度变化的主要因素。

考虑到不同竹子生长对温度变化的需求,本研究也试图将大气温度分别结合到对两种竹子密度的预测模型中,然而统计分析结果显示,温度并没有如预期的那样与竹子分布密度关系显著。分析其原因可能是因为:本研究中所采用的温度模型是一个概要性的、完全基于海拔梯度变化的温度预测模型,原作者的目的是为了进一步优化由于大的地形特点(如秦岭南北坡)所导致的温度沿高度变化的差异,而不是去简单地引用一个统一的温度模型,如海拔每升高100m,气温降低0.6度。加之温度与海拔的显著自相关,直接引入该模型并不合适。然而这并不意味着局部小气候的变化对竹子的密度分布没有影响,以后的研究可以考虑运用遥感热探测技术所生成的空间连续温度产品,并将其结合到对不同竹种的密度预测模型中去。

太阳辐射模型对小地形(如坡向和坡度)对辐射量影响的充分挖掘,最终表现在对林上和林下光照条件的准确预测,这也可能是其在本研究中所起重要作用的一个原因。把光照条件作为一个重要的环境因子引入到竹子密度预测模型中是本研究的一个创新点。结果说明光照条件确实与竹林的分布与生长有着显著的关系,加深了对竹子生长小生境的了解。从统计结果上看,巴山木竹的密度与林上光强显著相关,而秦岭箭竹却与林下光强关系显著。目前,造成这种不同的原因还不明确。但是初步推测可能是因为:(1)由于巴山木竹多生长于落叶阔叶林下,阔叶林的透光性较高,消光系数较小,而GLA软件在处理照片时没有考虑这些落叶林林冠的透光性,使得其林下光强被低估了。相反,秦岭箭竹多生长于针叶林区,针叶林的透光性较差,GLA软件能够比较正确地估算其林冠的透光能力,故得出了较准确的林下光强;(2)物候变化所导致的接收光照总量的不同。中低海拔落叶阔叶林长达6个月以上的叶子凋落期,也为巴山木竹提供了比多生长于针叶林下的秦岭箭竹更多的光照机会;(3)也有可能是两种竹子之间确实存在着对光照条件依赖程度的不同,但这还需要留待生物学上的进一步研究证实。

本研究对地形因子和光照条件与竹子的密度关系进行了有益探讨和尝试,然而,一些其它对竹子生长可能产生重要作用的因子,如降水和土壤条件等并没有被考虑在模型内。此外,该模型也存在一定局限,即不能用来严格区分竹林存在的有或无,无法解释无论是因为人类的活动,还是竹子的自然开花死亡而导致的无竹区。作者建议在以后的研究中应关注这些因子对竹子分布和生长的影响,并将其它有显著影响的因子也纳入该预测模型中来,从而提高竹林探测精度。

References :

[1] Schaller G B, Hu J C, Pan W S, *et al.* The Giant Pandas of Wolong. Chicago :Chicago University Press, 1985.

[2] Pan W S, Gao Z S, Lu Z, *et al.* The Giant Panda's Natural Refuge in the Qinling Mountains. Beijing :Beijing University Press, 1988.

[3] Reid D G, Hu J C. Giant panda selection between *Bashania fangiana* bamboo habitats in Wolong Reserve, Sichuan, China. *Journal of Applied Ecology*, 1991, 28 :228 - 243.

[4] Liu X H, Skidmore A K, Wang T J, *et al.* Giant panda movements in Foping nature reserve, China. *Journal of Wildlife Management*, 2002, 66 (4) :1179 - 1188.

[5] Qin Z S, Taylor A H, Liu J. Population structure and dynamic of bamboo in giant panda conservation. *Journal of Bamboo Research*, 1994, 13 (4) :4 - 15.

[6] Qin Z S, Taylor A H, Cai X S. Bamboo and Forest Dynamic in Succession in the Ecological Environment of Giant Panda in Wolong. Beijing : China Forestry Press, 1993.

[7] Li C B. Study of Food Bamboos of the Giant Panda. Guiyang :Guizhou Science and Technology Press, 1997.

[8] Yi T P. Classification and distribution of food bamboos of the giant panda. *Journal of Bamboo Research*, 1985, 4 (1) :17 - 21.

[9] Zhao X H, Liu G P, Ma Z F. Determination of Tannin in bamboo and its impact on the panda. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29 (4) :67 - 71.

[0] Ouyang Z Y, Liu J G, Xiao H, *et al.* An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (1) : 1869 — 1874.

[1] Liu J G, Linderman M, Ouyang Z Y, *et al.* Ecological degradation in protected areas :the case study of Wolong Nature Reserve. *Science*, 2001, 292 :98 — 101.

[2] Loucks C J, Lu Z, Dinerstein E, *et al.* The giant pandas of the Qinling Mountains, China :a case study in designing conservation landscapes for elevational migrants. *Conservation Biology*, 17 (1) :558 — 565.

[3] Xu W H, Ouyang Z Y, Li Y, *et al.* Habitat assessment on giant pandas in Qinling Mountains range based on RS and GIS. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006,21 (1) :238 — 242.

[4] Linderman M, Bearer S, An L, *et al.* The effects of understory bamboo on broad-scale estimates of giant panda habitat. *Biological Conservation*, 2005, 121 :383 — 390.

[5] Morain S A. Surveying China's agricultural resources :patterns and progress from space. *Geocarto International*, 1986, 1 :15 — 24.

[6] De Wulf R R, Goossens R E, MacKinnon J R, *et al.* Remote sensing for wildlife management :giant panda habitat mapping from LANDSAT MSS images. *Geocarto International*, 1988, 3 (1) :41 — 50.

[7] Linderman M, Liu J G, Qi J, *et al.* Using artificial neural networks to map the spatial distribution of understory bamboo from remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (1) :1685 — 1700.

[8] Yue M, Dang G D, Yong L J, *et al.* The basic features of vegetation of Foping Nature Reserve in Shaanxi Province. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1999, 17 (1) :22 — 28.

[9] Feng Y H, Feng L T, Yong Y G, *et al.* A taxonomic study on the bamboo as the main food of giant panda from the Qinling Mountains (1). *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2006, 36 (1) :101 — 103.

[10] Battles J J, Dushaoff J G, and Fahey T J. Line intersect sampling of forest canopy gaps. *Forest Science*, 1996, 42 (1) :131 — 138.

[11] Lin T C and Chiang J M. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan Journal for Forest Science*,2002,17 (1) :387 — 400.

[12] Hardy J P, Melloh R, Koenig G, *et al.* Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126 :257 — 270.

[13] Frazer G W, Canham C D, and Lertzman K P. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0. *Technological Tools. Bulletin of the Ecological Society of America*, 2000, 81 (1) :191 — 197.

[14] Kumar L, Skidmore A K, and Knowles E. Modeling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11 (1) :475 — 497.

[15] Rikimaru A, Roy P S, and Miyatake S. Tropical cover density mapping. *Tropical Ecology*, 2002, 43 (1) :39 — 47.

[16] Tang Z Y, Fang J Y, and Zhang L. Patterns of woody plant species diversity along environmental gradients on Mt. Taibai, Qinling Mountains. *Biodiversity Science*, 2004, 12 (1) :115 — 122.

参考文献：

[2] 潘文石,高郑生,吕植等,秦岭大熊猫的庇护所. 北京:北京大学出版社,1988.

[5] 秦自生,艾伦·泰勒,刘捷. 大熊猫栖息地主食竹类种群结构和动态变化. *竹子研究汇刊*,1994,13 (1) :4 ~ 15.

[6] 秦自生,艾伦·泰勒,蔡绪慎. 卧龙大熊猫生态环境的竹子与森林动态演替. 北京:中国林业出版社,1993.

[7] 李承彪. 大熊猫主食竹研究. 贵阳:贵州科技出版社,1997.

[8] 易同培. 大熊猫主食竹的分类和分布研究 (一). *竹子研究汇刊*,1985,4 (1) :17 ~ 21.

[9] 赵晓虹,刘广平,马泽芳. 竹子中单宁含量的测定及其对大熊猫采食的影响. *东北林业大学学报*,2001,29 (1) :67 ~ 71.

[0] 欧阳志云,刘建国,肖寒,等. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. *生态学报*,2001,21 (1) :1869 ~ 1874.

[3] 徐卫华,欧阳志云,李宇,等. 基于遥感和GIS的秦岭山系大熊猫栖息地评价. *遥感技术与应用*,2006,21 (1) :238 ~ 242.

[8] 岳明,党高第,雍立军,等. 陕西佛坪自然保护区植被的基本特征. *武汉植物学报*,1999, 17 (1) :22 ~ 28.

[9] 冯永辉,冯鲁田,雍严格,等. 秦岭大熊猫主食竹的分类学研究 (1). *西北大学学报 (自然科学版)*,2006,36 (1) :101 ~ 103.

[11] 林登秋,江智民. 半球面影像在森林生态研究的应用. *台湾林业科学*, 2002, 17 (1) :387 ~ 400.

[16] 唐志尧,方精云,张玲. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释. *生物多样性*,2004,12 (1) :115 ~ 122.