

集成的专家系统和神经网络应用于大熊猫生境评价^{*}

刘雪华^{1**} Andrew K. Skidmore² M. C. Bronsveld²

(¹清华大学环境科学与工程系,北京 100084; ²荷兰国际地理信息科学与地球观测学院,7500 AA Enschede, The Netherlands)

【摘要】 充分了解大熊猫生境的时空格局及其变化,对有效保护大熊猫非常重要。绘制生境图既是野生动物生境评价和监测的一个有效方式,也是一个必要的步骤。新发展起来的人工智能方法(包括专家系统和神经网络方法),在模拟复杂系统过程中能够同时综合定性和定量信息,并可集成于GIS中,有助于大熊猫复杂生境的制图及评价。为了对大熊猫生境进行评价,本文建立了一个较全面的综合制图方法,将专家系统、神经网络和多类型数据全部集成在GIS环境下。结果表明,采用专家系统和神经网络集成方法绘制的大熊猫生境图的精度达到80%以上,高于单一的专家系统方法、神经网络方法和传统的最大似然法制图的精度。Z统计方法也证实了新建立的专家系统和神经网络集成方法要显著好于3种单一方法。

关键词 专家系统 神经网络 遥感 地理信息系统 生境制图 空间分析 大熊猫 佛坪保护区
文章编号 1001-9332(2006)03-0438-06 **中图分类号** Q141 **文献标识码** A

Assessment of giant panda habitat based on integration of expert system and neural network. LIU Xuehua¹, Andrew K. Skidmore², M. C. Bronsveld² (¹Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ²International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 7500 AA Enschede, The Netherlands). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(3):438~443.

To conserve giant panda effectively, it is important to understand the spatial pattern and temporal change of its habitat. Mapping is an effective approach for wildlife habitat evaluation and monitoring. The application of recently developed artificial intelligence tools, including expert systems and neural networks, could integrate qualitative and quantitative information for modeling complex systems, and built the information into a GIS, which could be helpful for giant panda habitat mapping. This study built a mapping approach for giant panda habitat mapping, which integrated expert system and neural network classifiers (ESNNC), and used multi-type data within GIS. The giant panda habitat types and their suitability were mapped by ESNNC. The results showed that the habitat types and their suitability in Foping Nature Reserve were assessed with a higher accuracy (>80%) by ESNNC, compared with non-integrated classifiers, i. e., expert system, neural network, and maximum likelihood. Z-statistic test showed that ESNNC was significantly better than the other three non-integrated classifiers. It was recommended that the integrated approach could be widely applied into wildlife habitat assessment.

Key words Expert system, Neural network, Remote sensing, GIS, Habitat mapping, Spatial analysis, Giant panda, Foping Nature Reserve.

1 引言

生境是指能够为生物个体所占用的任何空间单位,不管时间多么短暂。野生动物生境的类型和条件影响着野生动物的分布和行为。因此,野生动物的生境评价已经成为世界生物多样性研究的一部分,主要研究方面包括:生境可得性^[29,30]、生境空间格局^[9]、生境利用^[1,11]、潜在生境的分布^[10,15,16]、生境适宜性评估^[24,28]、生境破碎化^[2,34]和生境变化检测^[25,29]。

生境制图是野生动物研究中重要的一个方面。绘制野生动物不同生境类型图,能够为调查和分析生境提供数据,并为生境管理者实施监测提供信息^[12]。而遥感(RS)和地理信息系统(GIS)是分析、监测和管理资源的两个强有力技术,也是生境制图

的必要工具。由于人类具有采用相对快速和经济的方法收集野生动物生境信息的需求,已使RS数据得到广泛应用,并在GIS支持下进行调查、处理数据,表述复杂生境的空间关系^[36]。野生动物生境评价领域的许多科学家都已经认识到了将RS和GIS综合在一起的重要性和实用性。

濒危大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)现今只分布在中国的六大山系,其森林生境随着时间的推移已大量减少并破碎化。为了有效地保护大熊猫,弄清大熊猫当前的生境状况及其变化是非常重要的。如果说恢复已丧失的大熊猫生境是不可能的,但维持和保护现存的大熊猫生境是可能的。De Wulf

^{*} 国家自然科学基金重点基金项目(30230080)及教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

^{**} 通讯联系人。

2005-03-07 收稿,2005-07-31 接受。

等^[6]认为,建立大熊猫的数字化生境数据库和生境监测系统,能为有效保护管理大熊猫及其生境提供有利的工具。

以有效方式获得有关大熊猫生境的信息是当前一个值得关注的研究领域。GIS 已经被应用在大熊猫生境研究上^[2,15,16,21,26]。但遥感技术在野生动物生境制图中的应用仍是一个还在发展的领域^[17],同样在大熊猫的生境制图和评价中应用也不多。在植被茂密的崎岖山地上进行地面调查是一项费时费力的工作,遥感途径无疑是快速、低成本获得生境信息的最有效方法,而且卫星重复飞越地面上空,给生境制图不仅提供了三维空间信息,还提供了时间信息^[6]。然而,遥感数据在大熊猫生境评价的应用或是建立在目视解译遥感影像基础上^[3,5,6,13,19,26],或采用传统的单纯依赖光谱的分类方法。目视解译方法的不足之处是解译者的主观性,尤其是在不同土地覆被类型之间的界线问题上,不同的解译者会产生不同的结果。在森林类型水平上传统光谱分类方法也很难得到令人满意的分类结果,故也难绘制一个高精度的森林类型图^[31,32]。

将人工智能系统(通常,包括专家系统和神经网络两部分)引入制图,并应用于野生动物生境评价,是一种新的途径,有可能对森林类型制图起一定的促进作用。因为人工智能的学习过程可以被嵌入到 GIS 中,这样在系统获取关于自然现象数据时,就会帮助系统适应地理数据的非精确性和大量性^[23]。象这样一个将遥感、地理信息系统和人工智能集成在一起的方法,能够处理大量的输入数据。专家系统允许将质量信息和数量信息综合到复杂系统的建模和处理中^[4],并已应用于森林类型制图^[31]及印度野牛的生境评价^[39]。神经网络也已成功地应用于影像的处理和分类。Skidmore 等^[32]认为,神经网络的反向传播方法与专家系统结合起来是非常有前景的。

本项研究创建了一个集成的专家系统和神经网络分类器,并绘制和评价了复杂的大熊猫生境。该方法的应用目的是有效地综合利用 TM 遥感数据、GIS 数据(包括数字高程模型、坡度模型及坡向模型)、地面调查数据(包括样方调查数据和无线电颈圈追踪数据)和专家知识,最终高精度地绘制大熊猫生境图,提取生境信息。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

选择佛坪自然保护区为研究区域。佛坪自然保护区(图

1)建于 1978 年,位于陕西省南部,秦岭中段南坡,佛坪县西北部,33°32′~33°34′N,107°40′~107°55′E,面积 290 km²。东西走向的秦岭山脉起到了自然地理屏障作用,阻挡了北方来的寒冷空气,形成了大熊猫的最北避难所。

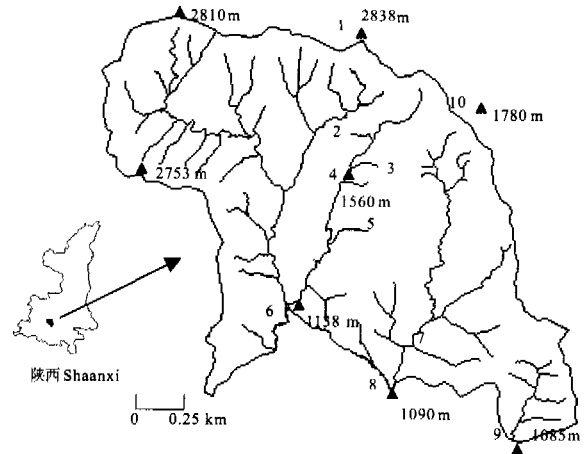


图 1 佛坪自然保护区

Fig. 1 Foping Nature Reserve.

1) 光头山 Guangtoushan mountain; 2) 纸场沟 Zhichanggou valley; 3) 牌坊沟 Paifanggou valley; 4) 三官庙 Sanguanmiao village group; 5) 水井沟 Shuijinggou valley; 6) 大古坪 Daguping village group; 7) 大城壕 Dachenghao; 8) 岳坝 Yueba village; 9) 龙潭子 Longtanzi village group; 10) 梁凤垭 Liangfengya.

佛坪自然保护区的地形西北高,东南低,海拔范围从 980~2 904 m。1 500 m 以下为中山陡坡峡谷,人为活动密集,而 1 500~2 000 m 则为中山的缓坡宽谷和平坦山脊区域,2 000 m 以上是中山的陡坡和宽阔山头区域^[27]。保护区内主要有 4 条水系,流经全区,为西河、东河、金水河和龙潭子河,均由北向南流。区内自然植被生长完好,垂直分布明显,主要分布着落叶阔叶林(海拔 2 000 m 以下)、针阔叶混交林和桦树林(2 000~2 500 m)、针叶林(2 500 m 以上),灌木和草甸。林下分布着 2 种不同竹子种类,均为大熊猫喜食竹种:巴山木竹(*Bashania fargesii*)和秦岭箭竹(*Fargesia qinlingensis*)^[27,35,38]。巴山木竹主要分布在海拔 1 900 m 以下区域,而秦岭箭竹则分布在海拔 1 900 m 以上区域。

2.2 研究方法

2.2.1 分类方法描述 集成的专家系统和神经网络方法(integrated expert system and neural network classification, ESNNC)是本研究建立的新的生境制图方法(图 2)。其假设是遥感影像能够反映土地覆被状况,且野外具有能够反映生境条件的生境参数测定和观测信息的样方^[7]。该方法将专家系统方法(expert system classification, ESC)和反向传播神经网络方法(back propagation neural network classification, BPN-NC)集成为一体,主体是神经网络系统。专家系统的结果含有非常有用的信息,被作为一层新的数据层输入神经网络系统,然后利用样点数据训练整个集成系统,以达到目标结果。这一过程为 ESNNC 的第 1 阶段,其原理是神经网络对于输入数据的微小变化很敏感,故建立在专家知识基础上的专家系统分类结果给神经网络系统带来了新的信息。考虑到系统

的敏感性,在整体样方数据中利用分层随机采样,采集一定训练样点,故每次训练样点都不一样,分类结果也不一样.利用一个“吻合频率检测程序”,对所有分类结果进行像元基础上的比较,并将出现频率最高的类型值赋予该像元.第2阶段为分类后处理过程,即根据专家知识,制定一些新的规则,用来更正分类结果中仍然存在的错误.

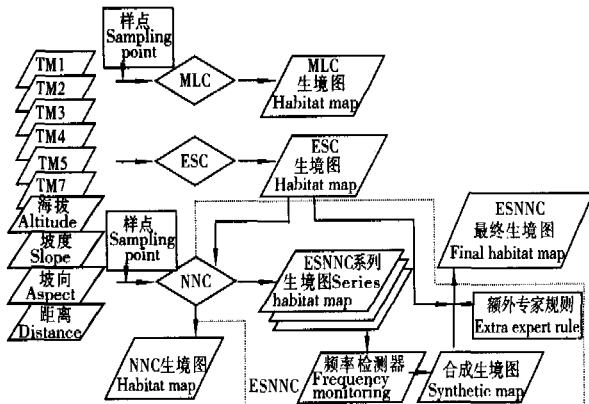


图2 用于绘制大熊猫生境图的集成专家系统和神经网络分类器(ESNNC)

Fig. 2 An integrated expert system and neural network classifier (ESNNC) for mapping both the ground-cover-based potential panda habitat types and the suitability-based panda habitat types.

TM 1~5 和 7 代表 TM 影像的波段 1~5 和 7 数据 TM 1~5 和 7 represents Landsat TM image bands 1~5 and 7; 输入数据“距离”指的是与人为活动区的距离“Distance” represents the distance map to the human activity area which is used only in mapping the suitability-based panda habitat types; MLC、ESC 和 NNC 分别代表最大似然分类法、专家系统分类法和神经网络分类法 MLC, ESC, and NNC are three classifiers; Maximum likelihood classifier, expert system classifier, and neural network classifier.

为了比较 ESNNC 制图的精度,还同时应用了 3 种单一的制图方法:传统的最大似然法(maximum likelihood classification, MLC)、规则基础上的专家系统方法和反向传播神经网络方法.

最大似然法(MLC)是常用的参数方法,其假设是数据呈现多个正态分布.具备了统计参数,就可以计算“马哈拉诺贝斯距离”.该距离可以表达为一个给定像素属于某个特定类别的可能性.MLC 的决策规则是:如果一个像元距离某一类别平均值的计算“马哈拉诺贝斯距离”最短,则将该像元划分到那个类别.该算法需要考虑所有训练样点构成的空间形状、大小和方向.如果各个类别训练样点在其特征空间呈正态分布,那分类结果出错的可能性最小,这种情况下 MLC 是最佳选择^[22, 33].然而,各个类别的训练样点在特征空间有时并不呈现正态分布.该方法依赖于样点数据.

专家系统方法(ESC)通常也被看作为知识库系统,它与后面叙述的神经网络系统方法都已在影像处理过程中被用来综合各种 GIS 信息^[37].专家系统结构变化多端,但它们均有两个特有的成分^[8, 31]:“知识库”和“推理器”.前者用来储存专家知识和规则,后者用来处理整个系统.当然还有另外两个很重要的成分:“知识获取模块”和“解释界面”.这里的推理器是以规则为基础的模型,通过贝叶斯概率论进行推理^[31],故不依赖于样点数据,且是非参数方法.

反向传播神经网络方法(BPNNC)是通过训练样点的学习来分辨光谱特征的非参数方法.它们通常由 3~4 层节点、一层输入层、一或多层中间隐含层和一层输出层构成. BPNNC 分类中包含 2 个阶段:训练阶段和分类阶段.训练过程中,神经网络的输出结果和目标结果之间的“错误”,通过不断调整整个系统中的所有权重而减小,直至“错误”减小到预先定义的阈值之下.训练一旦结束,神经网络系统那一时刻的所有权重和参数就被用来进行分类,计算出各个像元的结果,并确定像元的类型.神经网络方法因为要从样点数据学习,故依赖于样点数据提供的信息的准确性.

2.2.2 潜在大熊猫生境类型判别 以土地覆被类型为基础的潜在大熊猫生境类型图的绘制主要基于 160 个土地利用/土地覆被类型调查样点.其假设是遥感影像能够反映土地利用/土地覆被状况,野外采集的样方能够反映生境条件^[7].

为了与选用的 1997 年 7 月获取的遥感影像相吻合,野外地面调查在 1999 年 7 月和 8 月进行,地面调查总样点数为 160 个,记录了生境类型.为了在一定时间、一定路程内跨越尽量多的生境类型,调查采用了样线法.我们将研究区域内地面覆被类型概括为 8 种:针叶林、针阔叶混交林、阔叶林、竹丛、灌草地、农田和居民点、岩石和裸地、水体.

分类中,50 个样点首先从 160 个总样点中被随机采出,留用作独立的检测样点.生境制图利用了 9 个数据输入层,包括遥感数据(TM1-5, 7)和地形数据(海拔、坡度、坡向).专家系统的专家知识是根据野外调查及经验给出的.

2.2.3 大熊猫生境适宜性评价 大熊猫生境适宜性评价图的绘制,不仅基于野外调查样点(含有大熊猫痕迹数据),还基于无线电颈圈跟踪数据.其假设是大熊猫痕迹(如粪便、采食、卧穴等)越多的区域为适宜生境,具有大熊猫满意的环境条件.无线电颈圈跟踪数据能够很好地反应大熊猫对生境的选择.

绘制生境适宜性图总共用了 1 585 个样点,包括 160 个野外调查样点及 1 425 个无重叠的无线电颈圈跟踪定位点^[14, 17].1 585 个样点的适宜性类别是根据表 1 中的指标定义的,此研究中将生境适宜性分成 8 个等级:最适宜冬季生境、适宜冬季生境、最适宜夏季生境、适宜夏季生境、冬季生境过渡带、勉强生境、不适宜生境、水体.

分类中,700 个样点首先从 1 585 个总样点中被随机采出,留用作独立的检测样点.该生境制图利用了 10 个数据输入层,包括遥感数据(TM 1~5, 7)、地形数据(海拔、坡度、坡向)和人为活动数据(离人为活动区的距离).专家系统的专家知识是根据野外调查及经验给出的.

3 结果与分析

3.1 大熊猫生境类型图

ESNNC 绘制的以土地利用/土地覆被为基础的大熊猫生境类型图及其各生境类型的数量见图 3.由图 3 可以看出,针阔混交林和阔叶林覆盖了保护区近乎 91% 的面积,而北部和西北部山脊的高海

表 1 定义绘制生境适宜性图所用样点的适宜类型的指标

Table 1 Criteria to define suitability-based panda habitat types to the sample points for mapping in Foping Nature Reserve, China

适宜性指标 Suitability indicator	最适宜 冬季生境 Most suitable winter habitat	适宜冬季 生境 Suitable winter habitat	冬夏季生境 过渡带 Transfer region between winter and summer habitat	最适宜 夏季生境 Most suitable summer habitat	适宜夏季 生境 Suitable summer habitat	勉强生境 Marginal habitat	不适宜生境 Unsuitable habitat	水体 Water
海拔 Altitude (m)	≤1949	≤1949	1949~2158	≥2158	≥2158			
大熊猫痕迹 Giant panda signs	多 Many	存在 Present		多 Many	存在 Present			
坡度 Slope (°)	≤35	≤35		≤35	≤35	>35		
土地利用/土地植被为基础的 生境类型 Land use/cover-based habitat type							Fas Rab Shgr	War
离夏季活动范围中心的距离 ^{a)} Distance to summer activity center (m)				≤1000	>1000			
离冬季活动范围中心的距离 Distance to winter activity center ^{a)} (m)	005 & 043 ^{b)} 127 & 065 045 & 083	≤1500 ≤1300 ≤1000	>1500 >1300 >1000					
离交配活动范围中心的距离 Distance to mating activity center (m)	043 045	≤500 ≤1000	>500 >1000					

Fas: 农田和民宅 Farmland and settlements; Rab: 岩石和裸地 Rock and bare land; Shgr: 灌草丛 Shrub-grass land; War: 水体 Water. a) 具体描述见 Liu^[13]; b) 005 到 127 是 6 只熊猫在无线电颈圈跟踪时的编号 005 到 127 are code numbers for six giant pandas radio collared.

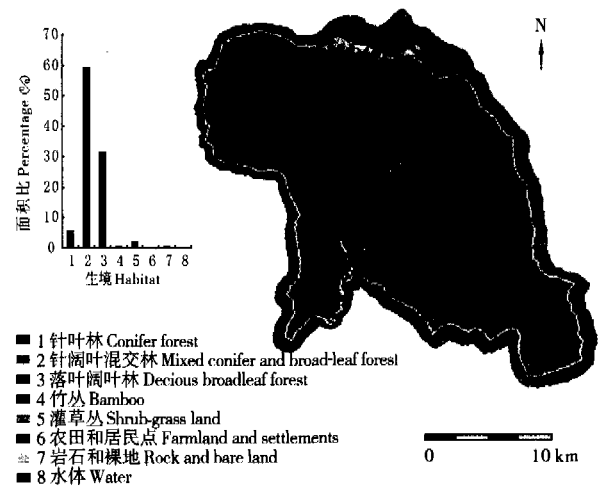


图 3 集成的专家系统及神经网络分类器(ESNNC)绘制的以土地利用/土地植被为基础的大熊猫生境类型图和各类型的面积百分比图

Fig.3 Ground-cover-based potential panda habitat map from the integrated expert system and neural network classifier (ESNNC) in Foping Nature Reserve, China and the figure of area percentage. 1) 针叶林 Conifer forest; 2) 针阔叶混交林 Mixed conifer and broad-leaved forest; 3) 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest; 4) 竹丛 Bamboo; 5) 灌草丛 Shrub-grass land; 6) 农田和居民点 Farmland and settlements; 7) 岩石和裸地 Rock and bare land; 8) 水体 Water. 白色边框是佛坪自然保护区的边界 White line gives the boundary of the Foping Nature Reserve. 边界以外显示保护区周围的生境类型 Area outside the boundary shows the surrounding environment.

拔针叶林和秦岭箭竹只占保护区面积的 6%，这 97% 的生境构成了佛坪保护区大熊猫的家園。灌草丛及岩石裸地总百分比只有 2.5%，其一部分分布在高山，一部分分布在河谷，而分布在河谷的灌草地及裸地多数情况下是因为人为活动干扰后形成的。农田和居民点主要分布在保护区南部河谷区的龙潭子、岳坝及大古坪，面积很小。检测出的水体面积也很小。

3.2 大熊猫生境适宜性图

ESNNC 绘制的大熊猫生境适宜性图及其各适宜度生境的数量见图 4。由图 4 可以看出，适宜及最适宜的夏季生境主要分布在佛坪保护区的西北、北和东北边界区域，面积约占 166%，其中最适宜夏季

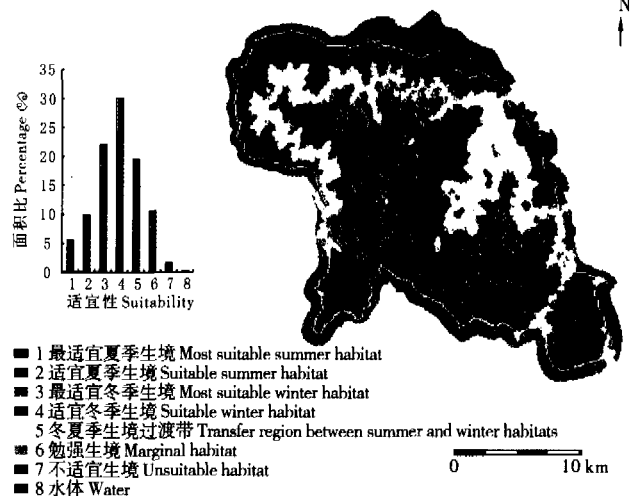


图 4 集成的专家系统及神经网络分类器(ESNNC)绘制的大熊猫生境适宜性和各类型的面积百分比

Fig.4 Suitability-based real panda habitat maps from the integrated expert system and neural network classifier (ESNNC) in Foping Nature Reserve, China and the figure of area percentage.

1) 最适宜夏季生境 Most suitable summer habitat; 2) 适宜夏季生境 Suitable summer habitat; 3) 最适宜冬季生境 Most suitable winter habitat; 4) 适宜冬季生境 Suitable winter habitat; 5) 冬夏季生境过渡带 Transfer region between summer and winter habitats; 6) 勉强生境 Marginal habitat; 7) 不适宜生境 Unsuitable habitat; 8) 水体 Water. 白色边框是佛坪自然保护区的边界 White line gives the boundary of the Foping Nature Reserve. 边界以外显示保护区周围的生境类型 Area outside the boundary shows the surrounding environment. 黑色箭头显示当地老百姓与保护区外游客进出保护区及到达三官庙的通道 Black arrow line shows the path used by local people and tourists to move between the Sanguanmiao village group and outside of Foping NR.

生境仅占 6%，较集中分布在光头山附近。而适宜及最适宜的冬季生境占据佛坪保护区的中部腹地及绝大部分南部区域，面积占到保护区面积的 52%，其中最适宜的大熊猫冬季生境有多处呈现大面积连续分布，如东河一线东岸山坡、三官庙北部一片、佛坪西南角一片、及大古坪-岳坝之间的一片，可见佛坪保护区大熊猫的冬季生境面积要远多于夏季生境。冬季和夏季生境之间存在一个过渡带，占近 20% 的保护区面积。根据野外调查，过渡带的竹子分布不均匀，有的地方有，有的地方无，且生长不好；过渡带的空间格局也不一样，大部分过渡带都较宽，而东河和西河北部的过渡带比较窄，这可能也是为什么佛坪大熊猫选择该区域往返于冬夏季生境。勉强生境的主要限制因素是坡度，超过 35° 的陡坡生境散布于保护区内，占保护区面积的 11%。不适宜生境面积很小，仅占 2%，主要分布在河谷低地的人为活动区、河谷岩石区、高山岩石区。

3.3 制图精度检验

4 种分类方法绘制评价两种大熊猫生境图的精度结果不同，具体反映在可判别类型数目、分类总体精度、卡帕精度、以及用于比较两个分类器好坏程度的 Z 值不同(表 2)。传统的最大似然法没有生成令人满意的大熊猫生境图，在绘制生境类型图时只识别出 3 个类型，而在生境适宜性评价中识别了 7 个类型。对于建立在光谱信息基础上的最大似然法只能识别有足够样点数的地物类型，因为样点数不足是不能形成用于分类的统计参数的。ESNNC 在

表 2 4 个分类器在绘制佛坪自然保护区大熊猫生境图中的精度评价，及集成的专家系统与神经网络分类器(ESNNC)与其它分类器之间(BPNNC、ESC、MLC)的两两比较(通过 Z 统计分析)

Table 2 Accuracy assessment and pair wise comparison through Z statistic between the integrated expert system and neural network classifier (ESNNC) and the other classifiers respectively (i.e. the neural network classifier (BPNNC), the expert system classifier (ESC) and the maximum likelihood classifier (MLC) in mapping panda habitat types in Foping Nature Reserve, China

制图类型 Mapping type	分类器 Classifier	判别出 的地物 类型数目 Number of identified habitat type	总精度 Total mapping accuracy (%)	卡帕值 Kappa value	卡帕变化 Change Kappa value	Z 统计值 Z statistic value
生境类型图 Habitat type	ESNNC	8	84	0.801	0.0041	
生境适宜性图 Habitat suitability map	BPNNC ^a	8	70	0.622	0.0066	1.00
	ESC	8	76	0.703	0.0055	1.73*
	MLC ^a	3	NM	NM	NM	NM
生境适宜性图 Habitat suitability map	ESNNC	8	83	0.742	0.0004	
	BPNNC ^a	8	76	0.640	0.0005	3.25**
	ESC	8	48	0.358	0.0005	12.72**
	MLC ^a	7	NM	NM	NM	NM

a) 只运行一次分类；* 差异显著 (90% C.I.)；** 差异极显著 (95% C.I.)；“NM” 表示没有判别出所有 8 个类型而不提 Not mentioned due to that MLC does not identify all 8 types.

大熊猫生境制图中产生了最高的分类总精度(即 84% 和 83%)。而对于单一的 BPNNC，在绘制生境类型图时，分类总精度为 70%，低于 ESC 的精度即 76%；而在绘制生境适宜性图时，BPNNC 的精度达到了 76%，远好于 ESC 的精度 48%，这说明对于大熊猫生境适宜性的指标分级专家经验仍不足。Z 值表明，ESNNC 在多数情况下要较其它分类器好，且统计差异显著。

4 结 语

该项研究开发了集成的专家系统和神经网络分类器(ESNNC)，并应用于绘制和评价佛坪自然保护区大熊猫的生境图。该分类器能够处理多层数据。应用的结果表明，ESNNC 达到了最高分类精度，为佛坪保护区大熊猫及其生境的保护和自然资源的管理提供了更多更清楚直观的大熊猫生境信息，包括空间上、数量上的和质量上的。对于难度较大的生境区域，本研究也提供了一个较实际的制图方法，即利用有限的样点，进行整个区域的制图。

制图及评价的结果还表明，佛坪自然保护区维持了大熊猫所需的好生境，即 97% 的区域被森林覆盖，成为大熊猫的潜在生境，68% 的区域是大熊猫的适宜生境(包括冬夏季生境)。然而，美中不足的是佛坪的腹地，也是大片连续的最适宜冬季生境所在地，仍有一个村民小组(约 60 人左右)世代生活和生产在那里。如果能将这块土地上的人们做妥善安排，如迁出安置，逐渐恢复自然生境，佛坪的腹地将成为大片连续的大熊猫乐园。生境适宜性图中箭头所在位置，即佛坪东北角处，应采取措施进行保护，该区域已是大熊猫冬夏季生境的过渡带，也是连接北部夏季生境与南部夏季生境的重要卡口，生境条件欠佳。如果人为活动干扰日益扩大并严重的话，这块生境就可能失去，并直接影响到佛坪内部最佳的冬季生境，故建议应严格控制在该区域进行旅游开发活动。

参考文献

- Augustine DJ, Manzon A, Klopp C, et al. 1995. Habitat selection and group foraging of the springhare, *Pedetes capensis* larvalis Holister, in East Africa. *Afr J Ecol*, 33:347~357
- Chen L-D(陈利顶), Liu X-H(刘雪华), Fu B-J(傅伯杰). 1999. Evaluation on giant panda habitat fragmentation in Wolong Nature Reserve. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 19(3):291~297(in Chinese)
- Cui H-T(崔海亭), Zhang M-D(张妙弟). 1990. Giant panda habitat analysis in Xinglongling, Qinling Mountain using remote sensing. In: Commission on Physical Geography, the Geographic Society of China, ed. *Research of Bio-geography and Soil Geography*. Beijing: Science Press. 64~70(in Chinese)
- Davis JR. 1993. Expert systems and environmental modelling. In:

- Jakeman AJ, Beck MB, McAleer MJ, eds. Modelling Change in Environmental Systems. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 506~517
- 5 De Wulf RR, Goossens RE, Borry FC, et al. 1990. Monitoring deforestation for nature conservation management purposes in Sichuan and Yunnan Provinces, People's Republic of China, using multitemporal Landsat MSS and SPOT-1 HRV multispectral data. The Ninth EARSeL Symposium, 1989, Espoo. 317~323
 - 6 De Wulf RR, Goossens RE, MacKinnon JR, et al. 1988. Remote sensing for wildlife management: Giant panda habitat mapping from LANDSAT MSS images. *Geocarto Int*, 3(1):41~50
 - 7 Doering III JP, Armijo MB. 1986. Habitat evaluation procedures as a method for assessing timber-sale impacts. In: Verner J, Morrison ML, Ralph CJ, eds. Wildlife 2000-Modelling Habitat Relationships of Terrestrial Vertebrates. Stanford Sierra Camp, Fallen Leaf Lake, California, 7~11 October 1984. Wisconsin: University of Wisconsin Press. 407~410
 - 8 Forsyth R. 1989. Expert Systems Principles and Case Studies. New York: Chapman and Hall.
 - 9 Gustafson EJ, Parker GR, Backs SE. 1994. Evaluating spatial pattern of wildlife habitat: A case study of the wild turkey (*Meleagris gallopavo*). *Midland Nat*, 131(1):24~33
 - 10 Heer AM, Queen LP. 1993. Crane habitat evaluation using GIS and remote sensing. *Photogramm Eng Remote Sens*, 59(10):1531~1538
 - 11 Johnson D. 1980. The comparison of usage and availability measurements for evaluation resource preference. *Ecology*, 61(1):65~71
 - 12 Kerr RM. 1986. Habitat mapping. In: Cooperrider AY, Boyd RJ, Stuart HR, eds. Inventory and Monitoring of Wildlife Habitat. Washington, D.C: Government Printing Office. 49~68
 - 13 Li Z-X(李芝喜). 1990. Investigation for the giant panda habitat using remote sensing. *Remote Sens Environ(环境遥感)*, 5(2):94~101(in Chinese)
 - 14 Liu XH. 2001. Mapping and Modelling the Habitat of Giant Pandas in Foping Nature Reserve, China. Netherlands: FeboDruk BV, Enschede, The Netherlands.
 - 15 Liu XH, Bronsveld MC, Toxopeus AG, et al. 1997. GIS application in research of wildlife habitat change - A case study of the giant panda in Wolong Nature Reserve. *J Chin Geogr*, 7(4):51~60
 - 17 Liu X-H(刘雪华), Bronsveld MC, Toxopeus AG, et al. 1998. Application of digital terrain model(DTM) in the habitat research of the endangered animal species. *Prog Geogr(地理科学进展)*, 17(2):50~58(in Chinese)
 - 16 Liu XH, Skidmore AK, Wang TJ, et al. 2002. Giant panda movement pattern in Foping Nature Reserve, China. *J Wildlife Manage*, 66(4):1179~1188
 - 18 MacKinnon J, De Wulf RR. 1994. Designing protected areas for giant pandas in China. In: Miller RM, ed. Mapping the Diversity of Nature. London: Chapman & Hall. 127~142
 - 19 Morain SA. 1986. Surveying China's agricultural resources: Patterns and progress from space. *Geocarto Int*, 1(1):15~24
 - 20 Morrison ML, Marcot BG, Mannan RW. 1992. Wildlife-habitat Relationships: Concepts and Applications. London: The University of Wisconsin Press.
 - 21 Ouyang, ZY, Yang Z, Tan YC, et al. 1996. Application of geographical information system in the study and management in Wolong Biosphere Reserve. *MAB-China's Biosphere Res Ann*, (special):47~55
 - 22 Paola JD, Schowengerdt RA. 1994. Comparisons of neural networks to standard techniques for image classification and correlation. In: IGARSS'94, Pasadena, California, USA, 8~12 August 1994. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1404~1406
 - 23 Peuquet D, Davis JR, Cuddy S. 1993. Geographic information system and environmental modelling. In: Jakeman AJ, Beck MB, McAleer MJ, eds. Modelling Change in Environmental Systems. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd. 543~556
 - 24 Prasad SN, Chundawat RS, Hunter DO, et al. 1991. Remote sensing snow leopard habitat in the trans-Himalaya of India using spatial models and satellite imagery preliminary results. In: The Resource Technology 90' Proceedings. International Symposium on Advanced Technology in Natural Resources Management. Washington D.C: ASPRS 1991. 519~523
 - 25 Prasad SN, Goyal SP, Roy PS, et al. 1994. Changes in wild ass (*Equus hemionus Khur*) habitat conditions in Little Rann of Kutch, Gujarat from a remote sensing perspective. *Int J Remote Sens*, 15(16):3155~3164
 - 26 Ren G-Y(任国业), Yu G-N(喻歌农), Yan M-Z(晏懋昭). 1993. Approach for surveying and management of giant panda bamboo resources by means of GIS. *Southwest China J Agric Sci(西南农业学报)*, 6(3):33~39(in Chinese)
 - 27 Ren Y(任毅), Wang M-L(王玛丽), Yue M(岳明), et al. 1998. Plants of Giant Panda's Habitat of Qinling Mountains. Xi'an: Shaanxi Sciences and Technology Press. (in Chinese)
 - 28 Roy PS, Ravan SA, Rajadnya N, et al. 1995. Habitat suitability analysis of *Nemorhaedus goral* - A remote sensing and geographic information system approach. *Current Sci*, 69(8):685~691
 - 29 Sader SA, Powell GVN, Rappole JH. 1991. Migratory bird habitat monitoring through remote sensing. *Int J Remote Sens*, 12(3):363~372
 - 30 Scepan J, Davis F, Blum LL. 1987. A geographic information system for managing California condor habitat. *Geogr Inf Syst*, 2:276~286
 - 31 Skidmore AK. 1989. An expert system classifies Eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. *Photogramm Eng Remote Sens*, 55(10):1449~1464
 - 32 Skidmore AK, Turner BJ, Brinkhof W, et al. 1997. Performance of a neural network: Mapping forests using GIS and remotely sensed data. *Photogramm Eng Remote Sens*, 63:501~514
 - 33 Swain PH. 1978. Fundamentals of pattern recognition in remote sensing. In: Swain PH, Davis SM, eds. Remote Sensing: The Quantitative Approach. New York: McGraw-Hill. 137~187
 - 34 Tabarelli M, Mantovani W, Peres CA. 1999. Effects of habitat fragmentation on plant guild structure in the montane Atlantic forest of southeastern Brazil. *Biol Conserv*, 91:119~127
 - 35 Tian X-Q(田星群). 1989. Bamboo species in giant panda distribution area in Qinling Mountains. *Shaanxi For Sci Technol(陕西林业科技)*, 3:72~75(in Chinese)
 - 36 Wheeler DJ, Reid MK. 1984. A geographical information system for resource managers based on multi-level remote sensing data. Centre for Remote Sensing and Cartography Report 84-1. Salt Lake City: Utah University.
 - 37 Wilkinson GG, Kanellpoulos I, Kontoes C, et al. 1992. A comparison of neural network and expert system methods for analysis of remotely-sensed imagery. In: IGARSS'92, Houston, TX, USA. 62~64
 - 38 Yong Y-G(雍严格), Wang K-W(王宽武), Wang T-J(汪铁军). 1994. Movement habits of the giant pandas in Foping. *Acta Theriologica Sin(兽类学报)*, 14(1):9~14(in Chinese)
 - 39 Zhang H-L(张洪亮), Wang R-C(王人潮), Li Z-X(李芝喜). 1999. GIS-based ecotope types and their relationship with survival of *Bos gaurus readei*. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 10(5):619~622(in Chinese)

作者简介 刘雪华,女,1964年生,博士,副教授.主要从事保育生态学、植物地理学、环境遥感、生态评价及规划研究,发表论文40篇. Email: xuehua-hjx@tsinghua.edu.cn

责任编辑 肖红