

引用格式: 廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778. [Liao Y, Wang X Y, Zhou J M. 2016. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector. Journal of Geo-information Science, 18(6): 767-778.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.00767

基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证

廖颖^{1,2}, 王心源^{1*}, 周俊明³

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国天绘卫星中心, 北京 102102

Suitability Assessment and Validation of Giant Panda Habitat Based on Geographical Detector

LIAO Ying^{1,2}, WANG Xinyuan^{1*} and ZHOU Junming³

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. TH-Satellite Center, Beijing 102102, China

Abstract: The suitability assessment of wildlife habitat is very important for wildlife management and protection. Niche model is the most commonly used presence-only based habitat suitability model, which cannot explicitly express the quantitative relationship between the suitability of wildlife habitat and the environmental factors, and would be insufficient to express the ecological effects of environmental factors on wildlife habitat use. In this study, a new giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment method based on geographical detector (Geogdetector) is proposed. A total of 8 environmental factors were selected for the suitability assessment of giant panda habitat, including the elevation, slope, aspect, topographic position index, distance from drainage system, vegetation type, staple food sources of bamboo, and distance from human settlements. Based on the initial habitat suitability index (HSI) input data calculated by Analytic Hierarchy Process (AHP) and MAXENT model respectively, we used four geographical detectors (the risk detector, factor detector, ecological detector, and interaction detector) to assess the relationship between the suitability of giant panda habitat and their environmental risk factors. Results show that the suitability assessment of giant panda habitat based on the geographical detector has relatively favorable precision and feasibility. (1) The MAXENT-Geogdetector model has higher level of performance on accuracy than the other three methods. The overall accuracy of the prediction results based on AHP, AHP-Geogdetector, MAXENT and MAXENT-Geogdetector are 85.6%、86.5%、91.3% and 94.2% respectively. The kappa coefficients are 0.699, 0.718, 0.821 and 0.882 respectively. The AUC values are 0.902, 0.928, 0.949 and 0.966 respectively. And the overlap ratios of the predicted distribution area to the actual distribution area are 63.66%, 61.30%, 76.70% and 90.10% respectively. (2) The proposed Geogdetector-based method well captures the ecological effects of environmental factors on the wildlife habitat use by indicating the quantitative relationship between the suitability of wildlife habitat and the environmental factors.

Key words: giant panda; geographical detector; analytic hierarchy process; MAXENT; habitat suitability assessment

***Corresponding author:** WANG Xinyuan, E-mail: wangxy@radi.ac.cn

摘要: 动物生境适宜度评价对于野生动物生境保护十分重要。基于物种活动点来建模的生态位模型是目前应用最广泛的动物生境评价方法, 但该方法不能直接表达生境适宜度与环境因子间具有生态学意义的数量关系。本文以雅安地区为例, 提出一种新的大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 生境适宜度评价方法, 选取海拔、坡度、坡向、地形指数、距水源距离、植被类型、主食竹及距公路距离 8 个环境因子, 引入地理探测器, 在分别基于 MAXENT 模型和层次分析法 (The Analytic Hierarchy Process,

收稿日期 2015-09-08; 修回日期: 2015-12-09.

基金项目 国家国际科技合作专项(S2013GR0477)。

作者简介 廖颖(1990-), 女, 硕士生, 研究方向为遥感与生态环境评价。E-mail: lysky.cool@163.com

*通讯作者 王心源(1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为遥感地学应用、数字遗产。E-mail: wangxy@radi.ac.cn

AHP)所构建生境适宜度模型的基础上,通过4个地理探测器(风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器)探寻大熊猫生境与各环境因子间的关系以及环境因子对大熊猫生境的影响机理,并将其预测结果与单一MAXENT模型和AHP法进行对比。结果表明:(1)AHP、AHP-Geogdetector、MAXENT和MAXENT-Geogdetector模型总体评价精度分别为85.6%、86.5%、91.3%和94.2%,kappa系数分别为0.699、0.718、0.821和0.882,AUC值分别为0.902、0.928、0.949和0.966,模型所预测的适宜和较适宜区与实际分布区重叠比分别为63.66%、61.30%、76.70%和90.10%,说明AHP-Geogdetector和MAXENT-Geogdetector模型精度均比相应的单一模型有所提高,且MAXENT-Geogdetector模型精度最高;(2)基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型能以“生境适宜度和环境因子间具有生态学意义的数量关系”的形式直接体现环境因子对动物生境利用的生态学作用,具有较好的生态学可解释性。因此,用地理探测器进行大熊猫生境适宜度评价具有较好的可行性。

关键词:大熊猫;地理探测器;层次分析法;MAXENT;生境适宜度评价

1 引言

动物生境是动物生存与繁衍的重要场所,其质量的优劣对于生物多样性及物种的延续至关重要^[1]。生境适宜度(Habitat Suitability Index, HSI)是衡量生境质量的重要指标,是分析物种种群减少及致危原因的重要手段,可为野生动物管理与保护提供决策依据,并被广泛应用于动物生境质量的研究中^[2-4]。

随着计算机技术、3S技术以及统计学的发展,关于HSI建模的方法层出不穷。根据模型所需物种活动痕迹点的不同,HSI模型主要分为3类^[5]:机理模型^[6-9](AHP法等)、回归模型(广义线性回归模型^[10]、Logistic回归模型^[11]、人工神经网络模型^[14]等)以及生态位模型(生态位因子分析模型^[5]、信息熵模型^[12]等)。机理模型不需要目标物种活动点和非活动点数据,但依赖于专家经验知识,且因没有物种活动点数据,往往无法对模型结果进行校验。回归模型需要目标物种活动点和非活动点数据,但因物种非活动点数据的可靠性难以保证,因而模型结果可能会出现偏差。生态位模型只需要物种活动点数据。已有研究表明,生态位模型是目前应用较广的生境适宜度模型,而MAXENT是该类模型中预测结果相对准确的一种方法^[13]。MAXENT模型能很好地表达生境适宜度与环境因子间的数量关系,但通常这种数量关系及其生态学意义都是隐含的,导致模型的可解释性较差,不利于对大熊猫生境进行保护和规划。地理探测器模型是由王劲峰等开发的一种新型空间分析模型,用以探测某地理属性与其解释因子之间的关系^[14]。该方法基于空间分异理论,以“因子力(Power of Determinant)”作为度量指标,结合GIS空间叠加技术和集合论,探测属性y与其解释因子之间关系,形成“地理探测器”模型,从而可以有效地识别因子变量与结果变量间的相关关系^[18]。该方法最大的优势在于没有过多的

假设条件与约束,具有普适性,能有效地克服传统统计分析方法处理类别变量的局限性^[15],并能快速、经济、有效、客观地探测出要素间的关系,已被应用于医学^[14]、地质灾害^[15]、植被种植^[16]、考古学^[17]、经济^[18]等诸多领域。但地理探测器在建模之前需要对连续型环境因子进行离散化处理,不同的离散化处理方法会对建模结果产生不同的影响。目前,关于Geogdetector在动物生境评价中的应用尚未见报道。

考虑各类模型的优缺点,综合利用不同模型,能有效利用不同模型的优势,从而得出更为可靠的动物生境适宜度评价结果。因此,为探寻更准确的预测结果以及更接近现实的生态学解释,本文以四川省雅安地区为研究区,提出一种新的大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境适宜度评价方法,即基于地理探测器(Geographical detector, Geogdetector)来构建HSI模型。选取海拔、坡度、坡向、地形指数、距水源距离、植被类型、主食竹及距公路距离8个环境因子,分别在基于MAXENT模型和AHP法所获取的大熊猫生境适宜度指数基础上,通过风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器4个探测器,探测出大熊猫生境的影响因素、其相应的影响力以及具体的影响机理,并将最终获取的生境适宜度评价结果与单一MAXENT、AHP预测结果进行对比分析,以期能为动物生境评价方法提供一种新的思路。

2 研究区概况

雅安是大熊猫的发现地,是“熊猫首都”,也是全世界大熊猫栖息地的核心地带。据第四次大熊猫调查,雅安市境内野生大熊猫共340只,占四川省野生大熊猫总数的24.51%,在各市(州)中排名第三。全市大熊猫栖息地面积为54.8万hm²,是全国和全省大熊猫栖息地面积最大的市。此外,雅安市

全部县区都发现有野生大熊猫^[19],但因第四次大熊猫调查统计数据截至2013年,目前统计有大熊猫分布数据的县区主要有宝兴县、天全县、荥经县、芦山县和石棉县。为更有效地评估大熊猫栖息地质量,本文重点关注雅安市分布有野生大熊猫的完整区域,包括宝兴县、天全县、荥经县、芦山县4个县。

本研究区(102°15′~103°23′E,29°28′~30°56′N)位于四川盆地西缘,邛崃山东麓,雅安市北部(图1)。这里水源丰富,气候适宜,地形呈北、西、南地势高,东部地势较低的地理格局,并分布有4个重要的大熊猫自然保护区,即蜂桶寨国家级自然保护区、喇叭河省级自然保护区、大相岭省级自然保护区以及大川河自然保护区。根据全国第四次大熊猫调查显示,该地区分布有野生大熊猫315只,其中,宝兴县181只,天全县78只,荥经县28只,芦山县28只^[19]。

3 方法和数据

3.1 研究方法

3.1.1 层次分析法

层次分析法(AHP法),是20世纪70年代由T. L. Saaty提出的一种决策方法。该方法将一个复杂问题分解成多个因素,按照各因素的相互作用关系形成一定的层次结构,通过层析划分找出各要素之间的逻辑关系,以此判断各因子的重要性,并根据重要性赋予各因子相应的权重值,再通过叠加分析来预测物种的生境分布情况^[20]。其基本步骤为:

(1)构建层次结构模型。将各个因素分解成若干层次,同一层的各因素既从属或影响上一层因

素,又支配或影响下一层的因素。最上层为目标层,最下层为指标层,中间有一个至多个层次。

(2)构造判断矩阵。按照层次分析法的原理,利用根据Saaty提出的1-9比较标度法^[21],两两比较确定指标的重要程度,确定各层的判断矩阵。

(3)计算权向量并做一致性检验。计算每一个判断矩阵最大特征根及对应特征向量,利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率做一致性检验。若检验通过,归一化后的特征向量即为权向量;若未通过,则需重新构建判断矩阵。

(4)计算权向量并做组合一致性检验。计算最下层对目标层的组合权向量,并进行组合一致性检验。若检验通过,则可按照组合权向量表示的结果进行决策,否则需要重新考虑模型或构造一致性比率较大的判断矩阵。

3.1.2 MAXENT模型

MAXENT模型源于1957年Jaynes提出的最大熵理论(Maximum Entropy, MAXENT),是生态位模型中一种新型预测物种分布的方法。该方法将研究区内所有像元作为构成最大熵的可能分布空间,通过已知物种分布点的环境变量特征得出约束条件,来探寻此约束条件下最大熵的可能分布,从而预测物种在研究区的生境分布^[22]。

3.1.3 地理探测器

地理探测器是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰等开发的用以探寻地理空间分区因素对疾病风险影响机理的一种方法^[14],主要由4个探测器组成:风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互探测器。其中,风险探测器主要用于搜索生

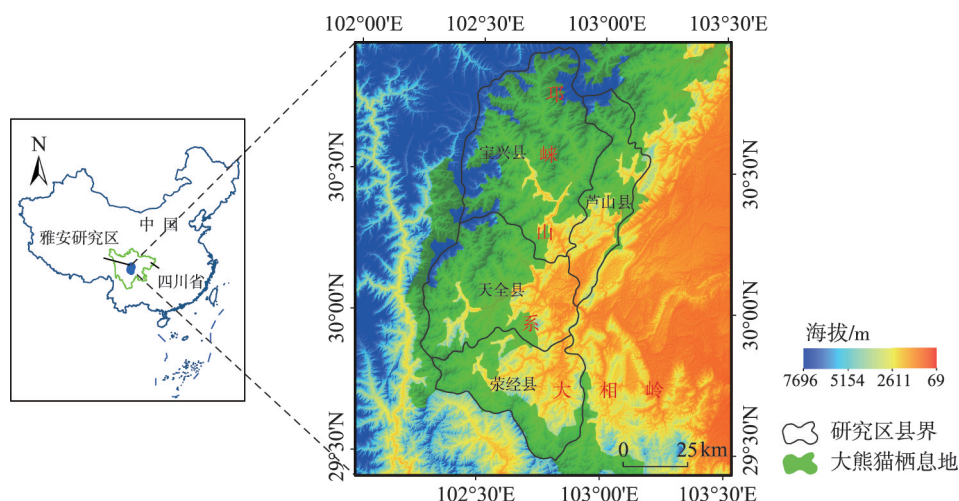


图1 雅安研究区地理位置示意图

Fig.1 Location of Ya'an prefecture

境适宜度的区域;因子探测器主要用于检验某种环境因子是否为形成生境适宜度空间分布格局的原因;生态探测器主要用来探究不同环境因子在影响生境适宜度空间分布方面的作用是否有显著的差异;交互作用探测器可以识别环境因子两两之间的交互作用^[23]。

地理探测器假设地理事物总是存在于特定的空间位置,影响其变化的环境因子在空间上具有差异性,若某环境因子与地理事物的变化在空间上具有显著一致性,则该环境因子对地理事物的发生与发展具有决定意义^[14]。

如图2所示,假设在研究区A中,生境适宜度是以B中的方格为单位统计的,各方格的生境适宜度指数记作 b_1, b_2, \dots, b_n ;C、D是其中2个影响生境适宜度的因素, $c_1、c_2、c_3$ 和 $d_1、d_2、d_3$ 是因素C和因素D各自的空间类别分区。本研究中, $c_1、c_2、c_3$ 和 $d_1、d_2、d_3$ 是对各环境因子进行适宜度分类后所

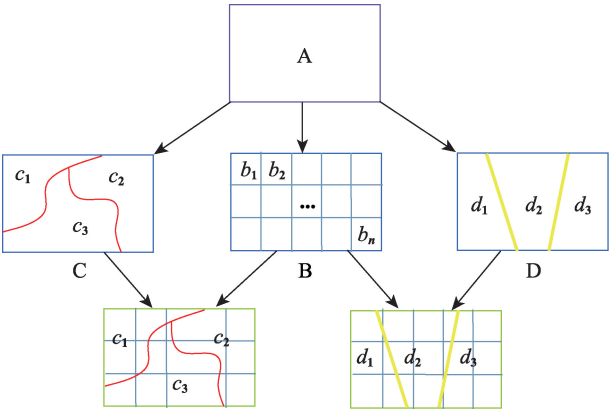


图2 研究区的空间类别分区及叠加图层^[14]

Fig.2 Divisions of the study region and the overlaid layers^[14]

得到的因子变量(亦即连续地理数据的离散化结果),不论是基于AHP生境适宜度指数的地理探测器还是基于MAXENT生境适宜度指数的地理探测器,一律采用AHP大熊猫生境适宜度影响因子评价准则进行环境因子适宜度分类。

在空间变异分析(Spatial Variance Analysis, SVA)的基础上,地理探测器先将生境适宜度HSI图层与环境因子图层作空间叠加,再通过对环境因子的不同空间类别分区间进行生境适宜度均值差异的显著性检验,从而探测出环境因子间的相对重要性及其与生境适宜度之间的关系。各环境因子对生境适宜度的解释力(PD值)可用式(1)说明^[23]。

$$P_{D,H} = 1 - \frac{n_{c_1} Var_{c_1} + n_{c_2} Var_{c_2} + n_{c_3} Var_{c_3}}{n Var} = 1 - \frac{\sigma_{ls}^2}{\sigma_{lp}^2} \quad (1)$$

式中: D 为影响因子; H 为生境适宜度指数(HSI值); $P_{D,H}$ 为 D 对 H 的解释力; $\frac{n_{c_1} Var_{c_1} + n_{c_2} Var_{c_2} + n_{c_3} Var_{c_3}}{n Var}$ 为分区离散方差之和占研究区HSI值总体离散方差的比例。

分别计算PD(A)、PD(B)和PD(A∩B),根据可能出现的5种情况(表1),即可判断出环境因子之间的交互作用。

为实现基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价,本研究首先选取海拔、坡度、坡向、地形指数、距水源距离、植被类型、主食竹及距公路距离8个环境因子,并基于AHP评价准则对其进行离散化处理;然后确定生境适宜度HSI值和样本点;接着计算各环境因子的PD值,以此判断环境因子变量与之间的关联程度;最后对所PD值进行均一化,获得各环境因子适宜度得分的优化权重,再利用Arc-

表1 因子交互关系的坐标轴表达

Tab.1 Redefined interaction relationships in a coordinate system		
图示	表达式	交互关系
	$PD(x \cap y) < \min(PD(x), PD(y))$	非线性减弱
	$\min(PD(x), PD(y)) < PD(x \cap y) < \max(PD(x), PD(y))$	单方减弱
	$PD(x \cap y) > \max(PD(x), PD(y))$	相互增强
	$PD(x \cap y) = PD(x) + PD(y)$	相互独立
	$PD(x \cap y) > PD(x) + PD(y)$	非线性增强

注:●表示 $\min(PD(x), PD(y))$;●表示 $PD(x) + PD(y)$;●表示 $\max(PD(x), PD(y))$;▼表示 $PD(x \cap y)$ 。引自<http://www.sssampling.org/excel-Geodetector/>

GIS 10.0进行指标整合,即可得到基于地理探测器的HSI模型。为使地理探测器评价结果达到最佳,根据生境适宜度HSI值的不同来源,本文开展了2种地理探测器模型研究,即AHP-Geogdetector模型与MAXENT-Geogdetector模型。基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型的具体思路如图3所示。

3.2 数据来源与处理

3.2.1 指标选取

为了与选用的2001年6月13日获取的遥感影像相吻合,先后2次(2013年6月23日至7月5日、2014年6月7日至13日)对包含雅安研究区在内的大熊猫栖息地开展野外地面调查。地面调查主要对大熊猫栖息地的地理环境特征进行考察、对植被类型分类精度以及大熊猫生境适宜度评价结果进行验证,以及与当地相关研究部门进行资料与数据的交流共享。基于前期对研究区的实地考察,结合前人的研究成果^[24-26],本研究选取的影响大熊猫生境的变量包括以下3类:与地形有关的变量(海拔、坡度、坡向、地形指数以及距水系的距离)、与生物物理有关的变量(植被类型、主食竹空间分布)、与

人类活动相关的变量(距道路的距离)。

地形数据主要包括海拔、坡度、坡向、地形指数以及距水系的距离。海拔,即30 m精度的ASTER GDEM数据,m;坡度、坡向由DEM在ArcGIS 10.0中生成;地形指数是用来衡量一个研究点所处地形纵剖面的上下位置,对植被和水源有重要影响^[27],该指数由基于ArcView 3.3开发的Jeff Jenness地形指数工具箱(topographic position index toolbox)工具箱生成;水系提取于研究区的遥感影像数据,即在ArcGIS 10.0中,通过计算每个像元点到离其最近的水系的欧式距离,即可获取距水系的距离。考虑到雅安市第三次大熊猫调查的时间跨度为2001年5月至11月,兼顾遥感影像的数据质量,最终选用2001年6月13日的Landsat ETM+数据作为本研究的底层遥感影像数据。

与生物物理有关的数据包括植被类型和主食竹空间分布。研究区的植被类型由遥感影像数据进行监督分类获取,主要类型包括针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛与草甸以及其他。在四川省大熊猫栖息地,大约有70%以上的大熊猫活动在针叶林与针阔混交林,只有少于30%的大熊猫活动在阔叶林、灌丛及草甸中,而在其他土地覆盖类型中未

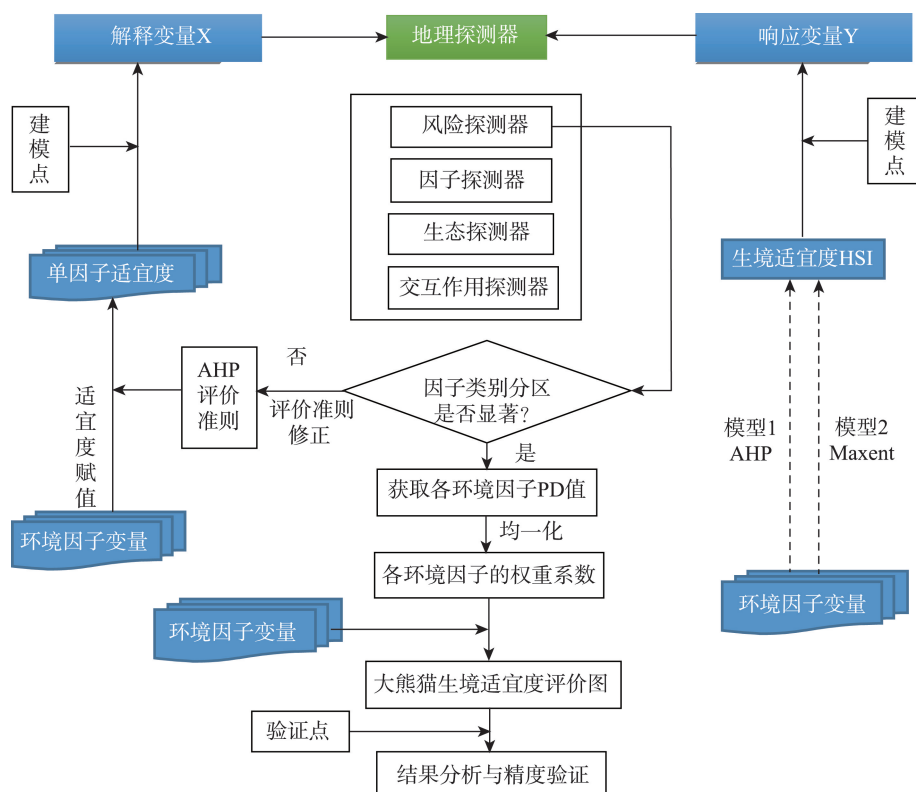


图3 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价流程图

Fig.3 The flowchart of assessing the habitat suitability for giant panda based on the geographical detector

见有大熊猫活动踪迹^[28]。因此,本研究将针叶林和针阔混交林视为大熊猫活动适宜区域;阔叶林、灌丛与草甸视为大熊猫活动次适宜区域;而其他植被类型则被视为大熊猫活动不适宜区域。

主食竹空间分布图来源于全国第三次大熊猫调查。雅安地区的竹类主要有冷箭竹、短锥玉山竹、拐棍竹及其他竹类。在雅安研究区所处的邛崃山系,大熊猫对拐棍竹的取食率最大,其主食竹包括冷箭竹、短锥玉山竹和拐棍竹^[28]。因此,本研究将分布有冷箭竹、短锥玉山竹、拐棍竹的区域视为大熊猫活动适宜区域;分布有其他竹类的区域视为大熊猫活动次适宜区域;没有竹类分布的区域视为大熊猫活动不适宜区域。

本研究中,与人类活动相关的数据主要是距道路的距离。目前,大熊猫受到的人类干扰因素较多,且各因素所起的作用比较复杂。居民日常活动、地质灾害、木材砍伐、交通、农业活动、林下资源采集等都是影响大熊猫生境质量的重要因素。雅安地区矿产与竹材资源丰富,因而在该地采矿、割竹与打笋情况较为严重,是雅安地区大熊猫栖息地的主要干扰因素之一,但该类数据不易获取,目前极少有研究将该类干扰因素加入到大熊猫生境适宜度评价中。此外,雅安地区居民大多生活在海拔相对较低的低山河谷地带,对大熊猫栖息地影响相对不大,且有全国第三次大熊猫调查结果表明,当前的耕种活动主要集中在低海拔的大熊猫栖息地边缘和居民点周围,耕种对大熊猫栖息地的总体影响不大^[28]。实践证明,林区道路通向哪里,采伐、采药、开矿等人为干扰就到达哪里,它是造成大熊猫栖息地破碎化的重要根源之一,且交通主干道对大熊猫栖息地具有隔离作用,其影响往往是持久而不可逆转^[28]。基于以上考虑,本次研究暂时只考虑道

路的影响。道路数据主要来自国家基础地理信息系统数据,并辅以前期野外调查的记录数据作为补充。距道路的距离主要采用与获取距水系距离相同的方法来生成。在进行生境适宜度建模前,AHP模型、AHP-Geogdetector模型及MAXENT-Geogdetector模型均需对各环境因子数据按照AHP大熊猫生境适宜度影响因子评价准则表(表2)重分类,并进行适宜度赋值(MAXENT模型使用连续型变量,所有数据无需进行离散化处理)。最后,将所有变量数据统一边界和坐标系统,并重采样为30 m×30 m。考虑到第四次大熊猫调查数据目前尚属于保密数据,而本文旨在验证地理探测器方法的有效性与可行性,故本文采用第三次大熊猫调查的相关数据来构建HSI模型。

3.2.2 样本值与采样点

本研究分别以基于AHP法和MAXENT模型所得到的大熊猫生境适宜度指数HSI为样本值。

有效选择样本点对于地理探测器评估结果的精度具有较大的影响^[14]。为提高生境适宜度评价精度,本文结合原始生境适宜度指数对样本点进行筛选,以保证网格点HSI值均匀分布为准则,最终选取417个有效样本点,并分别赋予相应的HSI值与各环境变量得分赋值作为样本属性。

采样点(共计417个)主要包括2部分:大熊猫活动点和非活动点。大熊猫活动点数据全部取自全国第三次大熊猫调查中研究区内的大熊猫分布点(183个);非活动点数据(共234个)一部分来源于前期野外调查(35个),另一部分主要通过ArcGIS 10.0中的随机选点功能获得。随机选点获取的非活动点实际上是一种伪非活动点。为提高非活动点数据的可靠性,减少非活动点落入适宜分布区的几率,采用MAXENT模型对随机产生的伪非活

表2 雅安地区大熊猫生境适宜度影响因子评价准则

Tab.2 Assessment criteria for the affecting factors on giant panda's habitat in Ya'an prefecture

目标层	因素层	指标层	适宜	较适宜	不适宜
雅安地区大熊猫 生境适宜性评A	地形因素 B1	海拔 C1/m	1800~3200	1200~1800,3200~3800	<1200,>3800
		坡度 C2/°	0~30	30~40	>40
		坡向 C3	南、东南、西南	东、东北、西	北、西北
		地形指数 C4	-5~5	-15~-5,5~15	>15,<-15
		距水源距离 C5/m	<2000	2000~4000	>4000
	生物因素 B2	植被类型 C6	针叶林、针阔混交林	阔叶林、灌丛及草甸	其他
		主食竹 C7	冷箭竹、短锥玉山竹、拐棍竹	其他竹类	无竹区
	干扰因素 B3	距公路距离 C8/m	>1000	500~1000	<500
	适宜度赋值		5	3	1

动点进行评估和筛选,最终选取199个点作为部分非活动点。研究表明,物种活动点数据的模型都可以用作评估伪非活动点的方法,来剔除落入被认为适宜分布区的随机非活动点,且这种方法比完全随机产生伪非活动点的预测结果更准确^[29]。

在417个大熊猫样点数据中,随机选取75%的样点数据(313个)来构建地理探测器模型,另外25%的样点数据(104个)则用于后期的模型验证。

3.3 精度验证

根据模型是否受临界值约束,模型的准确性分析可分为受临界值约束的准确性分析和不受临界值约束的准确性分析。目前,关于模型精度的检验最常用的方法主要有受临界值约束的kappa系数法和预测值与观测值匹配系数法^[11],以及不受临界值约束的ROC曲线法^[30]。本文还引入了物种分布的历史记录来检验预测模型^[29],通过计算目标物种实际适宜区与预测结果的重叠比来进行精度验证。

4 结果和分析

4.1 地理探测器空间分析结果

风险探测器揭示了各环境因子内部不同类别分区间的显著性差异。以MAXENT-Geogdetector模型为例,风险探测器发现从不适宜到适宜的大熊猫主食竹分区里大熊猫生境适宜度指数分别为0.101、0.475和0.563,且各区间适宜度的差异具有统计意义(表3)。由此说明,越适宜主食竹生长的区域越适宜大熊猫的生存。此外,大熊猫主食竹各类别分区彼此显著差异,说明各主食竹类别分区内的生境适宜度有较大区别,进而表明AHP法所构建的生境适宜度主食竹因子评价准则较为准确。对于其他环境因子,也可做类似分析。若环境因子不

同类别分区彼此无显著差异,则需对前期构建的生境适宜度评价准则进行修正,直至该因子各类别分区彼此差异显著。AHP-Geogdetector模型与此类似。

因子探测器揭示了各环境因子对生境适宜度影响的大小,MAXENT-Geogdetector模型中,各因子的解释力(PD值)依次为:主食竹(0.6936)、海拔(0.2745)、植被类型(0.2705)、坡度(0.1887)、地形指数(0.0582)、距道路距离(0.0315)、距水源距离(0.0126)、坡向(0.0026)。

生态探测器反应各环境因子对生境适宜度的影响是否显著差异。MAXENT-Geogdetector模型预测结果表明(表4),海拔、坡度、植被类型和主食竹对大熊猫生境适宜度的影响无显著差异;海拔与坡向、地形指数、距水源距离和距道路距离中任何一个因子对大熊猫生境适宜度的影响都具有显著差异;坡度、植被类型和主食竹均具有与海拔类似的特征;而坡向、地形指数、距水源距离和距道路距离对大熊猫生境适宜度的影响没有显著差异。从聚类的角度来看,可将海拔、坡度、植被类型、主食竹划分为对大熊猫生境影响显著的一类,而剩下的因子划分为对大熊猫生境影响不大的一类。结合因子探测器的结果,可以得出,海拔、坡度、植被类型、主食竹对生境适宜度影响相对较大,而其余因子影响相对较小。

交互作用探测器用来检验2种环境因自身独立起作用还是相互作用,若为相互作用,作用是增强还是减弱。MAXENT-Geogdetector模型结果(表5)表明,海拔与坡向、海拔与距道路距离、坡度与距道路距离、坡向与地形指数、坡向与植被类型、坡向与距道路距离、地形指数与距道路距离、距水源距离

表4 不同环境因子对生境适宜度影响的统计显著性差异
Tab.4 Statistically significant difference of the impacts for different risk factors on habitat suitability index

显著差异	海拔	坡度	坡向	地形指数	距水源距离	植被类型	主食竹	距道路距离
海拔								
坡度		N						
坡向		Y	Y					
地形指数		Y	Y	N				
距水源距离		Y	Y	N	N			
植被类型		N	N	Y	Y	Y		
主食竹		N	N	Y	Y	Y	N	
距道路距离		Y	Y	N	N	N	Y	Y

注:Y表示2个环境因子对大熊猫生境的影响具有显著性差异(置信度为95%);N表示无显著性差异

表3 大熊猫主食竹不同类别分区生境适宜度的统计显著性差异

Tab.3 Statistically significant difference of the average habitat suitability index between three primary bamboo zones

主食竹显著差异	不适宜	较适宜	适宜
不适宜			
较适宜	Y		
适宜	Y	Y	

注:Y表示2个主食竹类别分区对大熊猫生境的影响具有显著性差异(置信度为95%)

表5 2种环境因子(PD值)对大熊猫生境影响的交互作用
Tab.5 Interactive impact of each paired factors on the habitat of giant panda

		0.2745	0.1887	0.0026	0.0582	0.0126	0.2705	0.6936	0.0315
		海拔	坡度	坡向	地形指数	距水源距离	植被类型	主食竹	距道路距离
0.2745	海拔								
0.1887	坡度	0.362							
0.0026	坡向	0.292	0.191						
0.0582	地形指数	0.291	0.238	0.067					
0.0126	距水源距离	0.279	0.200	0.013	0.068				
0.2705	植被类型	0.432	0.380	0.281	0.323	0.275			
0.6936	主食竹	0.719	0.721	0.695	0.707	0.694	0.757		
0.0315	距道路距离	0.365	0.228	0.037	0.096	0.048	0.320	0.709	

与距道路距离、以及植被类型与距道路距离分别为非线性增强;而其余因子间为相互增强。总体而言,各环境因子间的交互作用都大于各单因子对生境适宜度的影响。

对各环境因子的PD值进行均一化,即可得到各环境因子适宜度的权重系数。

4.2 大熊猫生境适宜度评价结果

分别基于AHP-Geogdetector模型和MAXENT-Geogdetector模型对雅安地区大熊猫生境进行预测,以Nature break(Jean)法将大熊猫生境评价结果分级显示,分为适宜生境、次适宜生境、不适宜生境3类,并与单一AHP及MAXENT评价结果进行对比分析(图4)。

从空间分布来看(图4(a)-(e)),雅安地区大熊猫痕迹点主要分布于适宜与较适宜生境。对于适宜生境,4种方法的预测结果较为一致,从行政区划上来看,大熊猫主要分布在宝兴县、天全县西部以及芦山县北部。

对于较适宜生境,AHP预测结果最大,MAX-ENT模型预测结果最小。为对较适宜生境做进一步分析,将预测结果与雅安邻近区域大熊猫栖息地分布相叠加(由于篇幅关系,本文只列出AHP-Geogdetector和MAXENT-Geogdetector叠加分析结果图)。大熊猫栖息地数据由全国第三次大熊猫调查所得(包括调查中的栖息地及潜在栖息地),根据调查过程中大熊猫栖息地与潜在栖息地的确定方法,大熊猫栖息地必须有大熊猫分布且必须有适于大熊猫生息繁衍的生境条件,潜在栖息地是指与大熊猫栖息地相连、有适于或较适于大熊猫生息繁衍的生境条件,此次调查未发现大熊猫实体或其他活动痕迹,但未来很可能扩散过来的区域^[34]。因此,

这里所指的大熊猫栖息地理论上应与预测结果中的适宜与较适宜生境对应。

据全国第三次大熊猫调查,雅安地区大熊猫栖息地及潜在栖息地面积共计4385.02 km²,基于AHP、AHP-Geogdetector、MAXENT和MAXENT-Geogdetector模型所预测的适宜与较适宜区域与实际分布区(含大熊猫栖息地及潜在栖息地)重叠比分别为63.66%、61.30%、76.70%和90.10%。通过叠加分析(图4(c)、(f)),结合实地考察,单一AHP法和AHP-Geogdetector有较大范围较适宜生境预测结果(芦山县南部、天全县东部及荣经县东北部)属于居民聚居区(分别对应于芦山县县城、飞仙关镇、宝峰彝族乡等),MAXENT-Geogdetector模型预测结果与全国第三次调查中栖息地及潜在栖息地吻合度最好。

4.3 精度验证

(1)预测值与观测值匹配系数

利用剩余25%的样点数据(104个)对大熊猫生境适宜度评价结果进行验证。

首先,利用快速聚类法分别将基于4种方法获取的大熊猫生境适宜度图的结果转为二态值,其中大熊猫出现概率较大的一类设为1,即活动栅格(大熊猫适宜生境),反之则设为0,即非活动栅格。然后利用预测值与实际观测值的匹配系数分别对2种方法的评价结果进行验证,结果表明(表6),AHP法活动栅格、非活动栅格及模型总体精度分别为69.6%、98.3%和85.6%,AHP-Geogdetector法活动栅格、非活动栅格及模型总体精度分别为69.6%、100%和86.5%,MAXENT模型活动栅格、非活动栅格及模型总体精度分别为80.4%、100%和91.3%,MAXENT-Geogdetector法活动栅格、非活动栅格及模型总体精度分别为89.1%、98.3%和94.2%。

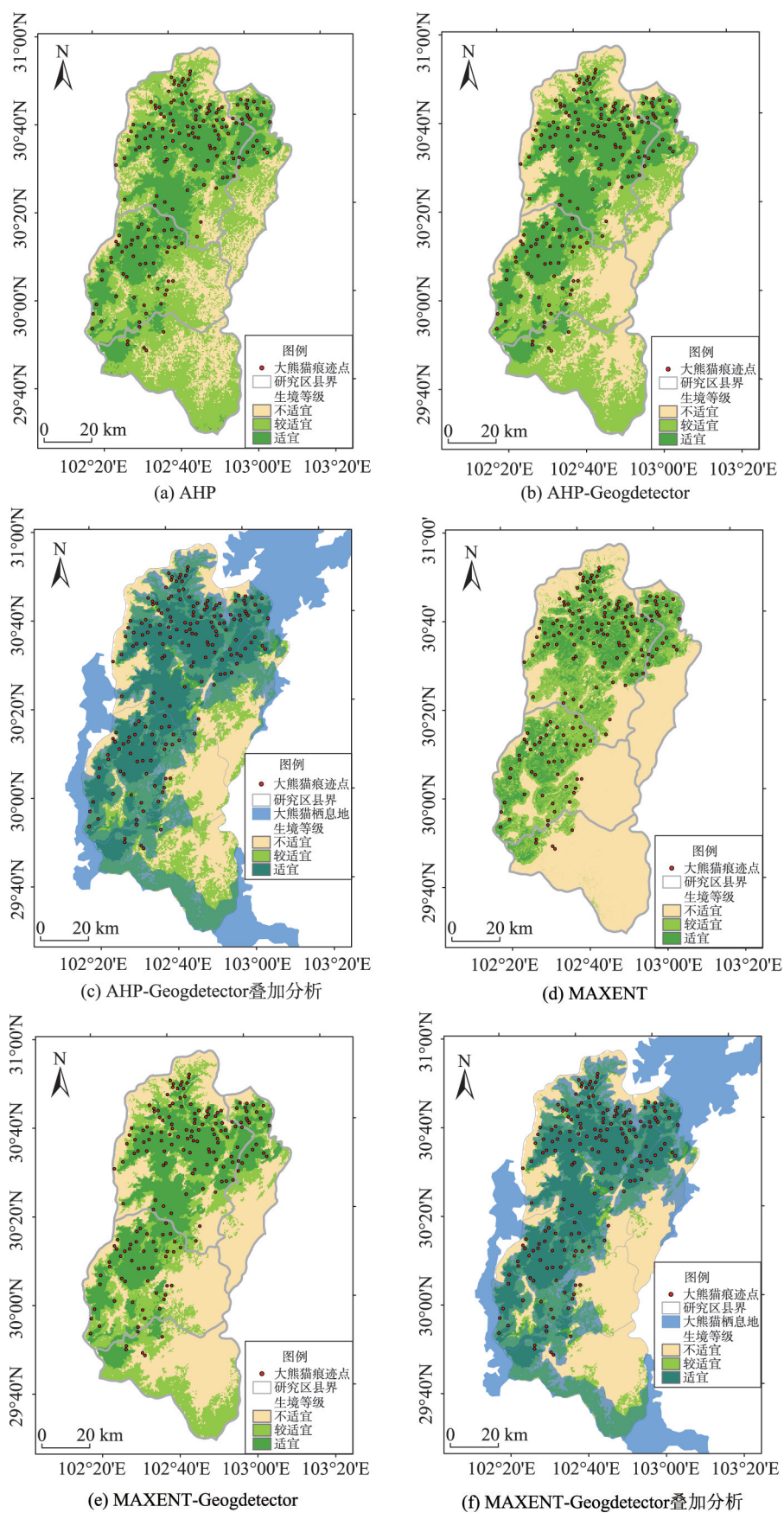


图4 雅安地区大熊猫生境分布

Fig.4 Distribution of giant pandas' habitats in Ya'an prefecture

表 6 模型分类精度
Tab.6 Classification accuracy of the four models

AHP				AHP-Geogdetector			
实际类别	预测类别		精度/(%)	实际类别	预测类别		精度/(%)
	活动栅格	非活动栅格			活动栅格	非活动栅格	
活动栅格	32	14	69.6	活动栅格	32	14	69.6
非活动栅格	1	57	98.3	非活动栅格	0	58	100
			85.6				86.5
MAXENT				MAXENT-Geogdetector			
实际类别	预测类别		精度/(%)	实际类别	预测类别		精度/(%)
	活动栅格	非活动栅格			活动栅格	非活动栅格	
活动栅格	37	9	80.4	活动栅格	41	5	89.1
非活动栅格	0	58	100	非活动栅格	1	57	98.3
			91.3				94.2

(2)Kappa 系数

Kappa 系数分析表明,基于 AHP、AHP-Geogdetector、MAXENT 和 MAXENT-Geogdetector 模型的 kappa 系数分别为 0.699、0.718、0.821 和 0.882。

(3)ROC 曲线

分别将基于 logistic 模型和 AHP 法所获得的大熊猫适宜度预测值和相应的诊断值(大熊猫活动点与非活动点)赋值给这些验证数据,并导入 SPSS19.0 进行 ROC 曲线分析,即可分别得到 2 种方法的 ROC 曲线和相应的 AUC 值。统计结果显示,基于 AHP、AHP-Geogdetector、MAXENT 和 MAXENT-Geogdetector 模型的 AUC 值分别为 0.902、0.928、0.949 和 0.966。

大熊猫生境适宜度评价结果的精度验证表明,无论是 kappa 系数法、预测值与实际观测值匹配系数法、ROC 曲线法,还是大熊猫栖息地实际分布图与预测结果的叠加分析,都证明 MAXENT-Geogdetector 模型对大熊猫生境空间分布拟合度较高,具有较高准确性,其预测精度比其他 3 种方法更高。

5 结 论

本文提出了一种基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价方法,分别在 MAXENT 和 AHP 大熊猫生境适宜度的基础上,通过 4 个地理探测器来探寻环境因子与大熊猫生境适宜度之间的关系,同时建立空间数据模型,并与单一 AHP 法和 MAXENT 模型的评价结果进行了对比分析,得到如下结论:

(1)针对 AHP 法主观性较强,MAXENT 模型评价精度较高但生态学可解释性较差的问题,基于地理探测器的大熊猫生境评价模型综合了 2 种方法的

优势,使大熊猫生境适宜度评价结果兼具主观判断与客观优化,一方面具有较高的评价精度,另一方面能使空间数据更为直观表达出其潜在含义,并能改进地理空间事件的预测和控制能力^[31]。无论是 AHP-Geogdetector 模型还是 MAXENT-Geogdetector 模型,模型精度都比相应的单一模型有所提高,且 MAXENT-Geogdetector 模型同时融合了 AHP、MAXENT 以及 Geogdetector 的优势,对大熊猫生境的预测结果精度最高,最接近实际情况。

(2)基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型能够完善专家知识库。通过风险探测器实现对传统机理模型的评价准则的检验与修正,再结合其他 3 个探测器,能深入探究各环境因子对大熊猫生境具体的影响机理,同时考虑各环境因子之间交互作用,可为后期大熊猫保护策略的制定提供直观的科学依据。

(3)地理探测器需要离散化数据,不同的离散方法会得到不同的 PD 值,即各环境因子生境适宜度的解释力。目前,本文采用的是地理探测器检验修正后的 AHP 环境因子评价准则,后续将进一步开展不同离散方法精度对比研究。

致谢:本文得到了中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰、中国科学院植物研究所申国珍、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所兰立波、中国科学院遥感与数字地球研究所赵颜创等在模型实现方面的技术支持,在此深表谢意!

参考文献(References):

[1] Reunanen P, Mönkkönen M, Nikula A. Habitat requirements of the Siberian flying squirrel in northern Finland: comparing field survey and remote sensing data[J]. Annal-

- es Zoologici Fennici, 2002,39(1):7-20.
- [2] 金龙如,孙克萍,贺红士,等.生境适宜度指数模型研究进展[J].生态学杂志,2008,27(5):841-846. [Jin L R, Sun K P, He H S, *et al.* Research advances in habitat suitability index model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008,27(5): 841-846.]
- [3] Lu C Y, Gu W, Dai A H, *et al.* Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: a case study of Schisandra sphenanthera Rehd. et Wils. In Qinling Mountains, China[J]. Ecological Modelling, 2012,242:105-115.
- [4] Song J W, Wang X Y, Liao Y, *et al.* An improved neural network for regional giant panda habitat suitability mapping: a case study in Ya'an prefecture[J]. Sustainability, 2014,6:4059-4076.
- [5] 王学志,徐卫华,欧阳志云,等.生态位因子分析在大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用[J].生态学报,2008,28(2):821-828. [Wang X Z, Xu W H, Ouyang Z Y, *et al.* The application of ecological-niche factor analysis in giant pandas (*ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):821-828.]
- [6] Wang X Z, Xu W H, Ouyang Z Y. Integrating population size analysis into habitat suitability assessment: implications for giant panda conservation in the Minshan Mountains, China[J]. Ecological Research, 2009,7(7):353-358.
- [7] Viña A, Tuanmu M N, Xu W H, *et al.* Range-wide analysis of wildlife habitat: implications for conservation[J]. Biological Conservation, 2010,143(9):1960-1969.
- [8] 孙贤斌,刘红玉.江苏盐城海滨区域丹顶鹤适宜越冬生境变化[J].生态学杂志,2011,30(4):694-699. [Sun X B, Liu H Y. Temporal changes of *Grus japonensis* suitable wintering habitat in coastal zone of Yancheng, Jiangsu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(4):694-699.]
- [9] 戎战磊,张晋东,洪明生,等.蜂桶寨自然保护区大熊猫生境适宜性评价与保护管理对策[J].生态学杂志,2015,34(3):621-625. [Rong Z L, Zhang J D, Hong M S, *et al.* Habitat suitability assessment and conservation strategies for giant pandas in Fengtongzhai Nature Reserve, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(3):621-625.]
- [10] Brotons L, Thuiller W, Araújo M B, *et al.* Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability[J]. Ecography, 2004,27(4): 437-448.
- [11] 李文军,王子健.丹顶鹤越冬栖息地数学模型的建立[J].应用生态学报,2000,11(6):839-842. [Li W J, Wang Z J. A wintering habitat model for red crown crane[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(6):839-842.]
- [12] Steven J P, Robert P A, Robert E S. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006,190(3-4):231-259.
- [13] 罗翀,徐卫华,周志翔,等.基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测[J].生态学报,2011,31(5):1221-1229. [Luo C, Xu W H, Zhou Z X, *et al.* Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(5):1221-1229.]
- [14] Wang J F, Li X H, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.
- [15] Hu Y, Wang J F, Li X H, *et al.* Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. PLoS ONE, 2011,6(6):e21427.
- [16] Li X W, Xie Y F, Wang J F, *et al.* Influence of planting patterns on Fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in north China[J]. Science of the Total Environment, 2013,458:63-69.
- [17] 毕硕本,计晗,陈昌春,等.地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J].地理科学进展.2015,34(1): 118-127. [Bi S B, Ji H, Chen C C, *et al.* Application of geographical detector in human-environment relationship study of prehistoric settlements[J]. Progress in Geography, 2015,34(1):118-127.]
- [18] 朱鹤,刘家明,陶慧,等.北京城市休闲商务区的时空分布特征与成因[J].地理学报.2015(8):1215-1228. [Zhu H, Liu J M, Tao H, *et al.* Temporal-spatial pattern and contributing factors of urban RBDs in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,8:1215-1228.]
- [19] 雅安市林业局.熊猫家源雅安大熊猫现状令人振奋——第四次大熊猫调查结果出炉[N/OL].雅安市人民政府官网[2015-3-31]. [2015-4-16].<http://www.yaan.gov.cn/html/openview.htm?id=20150331180705-755237-00-000>. [Ya'an Forestry Bureau. The status of giant panda in Ya'an are giving us exciting insights-the fourth national survey results on giant panda in China[N/OL]. <http://www.yaan.gov.cn/html/openview.htm?id=20150331180705-755237-00-000>, 2015-3-31/2015-4-16.]
- [20] 张巍巍.王朗自然保护区大熊猫生境质量评价[D].北京:北京林业大学,2014. [Zhang W W. The habitat quality evaluation of giant panda in Wanglang Nature Reserve [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.]
- [21] 曹长军,黄云.层次分析法在县域生态环境质量评价中的应用[J].安徽农业科学,2007,35(11):3344-3345. [Cao C J, Huang Y. Application of analytic hierarchy process in

- eco-environmental quality evaluation of county area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007,35(11): 3344-3345.]
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maxemum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006,190(3/4):231-259.
- [23] 王劲峰,廖一兰,刘鑫.空间数据分析教程[M].北京:科学出版社,2010. [Wang J F, Liao Y L, Liu X. Spatial data analysis tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [24] 李军锋,李天文,金学林,等.基于层次分析法的秦岭地区大熊猫栖息地质量评价[J].山地学报,2005,23(6):694-701. [Li J F, Li T W, Jin X L, *et al.* The quality evaluation of giant panda's habitat based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Mountain Science, 2005,23(6):694-701.]
- [25] Linderman M, Bearer S, An L, *et al.* The effects of understory bamboo on broad-scale estimates of giant panda habitat[J]. Biological Conservation, 2005,121:383-390.
- [26] 欧阳志云,刘建国,肖寒,等.卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J].生态学报,2001,21(11):1869-1874. [Ouyang Z Y, Liu J G, Xiao H, *et al.* An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001,21(11):1869-1874.]
- [27] Deng X Z, Jiang Q O, Ge Q S, *et al.* Impacts of the Wenchuan Earthquake on the giant panda nature reserves in China[J]. Journal of Mountain Science, 2010,7(2):197-206.
- [28] 国家林业局.全国第三次大熊猫调查报告[M].北京:科学出版社,2006. [State Forestry Administration. The third national survey report on giant panda in China[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [29] 林聪田,纪力强.PSDS2.0:一个基于GIS和多个模型的生物潜在分布地预测系统[J].生物多样性,2010,18(5):461-472. [Lin C T, Ji L Q. PSDS (predictive species distribution system) 2.0: a system based on GIS and multiple models for predicting potential distribution of species[J]. Biodiversity, 2010,18(5):461-472.]
- [30] 王小明.基于信息技术的枫桥香榉生境特征分析与适宜性评价[D].杭州:浙江大学,2010. [Wang X M. Study on the habitat characteristics and suitability evaluation of Chinese torvea based on information technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.]
- [31] 胡文艺.基于空间探测方法的珠峰景区旅游安全预警研究[D].成都:成都理工大学,2012. [Hu W Y. Research on early warning of tourism safety in Mount Everest Scenic Spot based on space exploration method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.]

时空大数据公共卫生应用 专辑征稿

全球气候变化和经济建设过程可能影响一些重要传染病、地方病和慢性病相关自然要素的时空分布格局,并使得传染病宿主动物和媒介生物的孳生场所、慢性病和地方病的病理环境发生改变,从而导致诸如新发传染病暴发流行、慢性病/地方病的敏感人群增加等现象。利用时空大数据,可以更有效地、多尺度地对疾病相关环境要素变化过程进行全方位监测和分析,实现对各种传染病、慢性病和地方病疫情的监控和风险评估,为国家疾病预防控制提供更为科学有效的监测和评估手段,进而实现传染病、慢性病和地方病的准确预测和高效干预。本刊特此围绕“时空大数据公共卫生应用”的主题征稿,内容包括但不限于:

- (1)时空公共卫生大数据理论与方法研究;
- (2)疾病环境相关要素提取与关联、监测与评估技术研究;
- (3)疾病预防控制服务平台与应用示范研究。

本刊特邀中国科学院地理科学与资源研究所庄大方研究员、中国疾病预防控制中心周晓农研究员、中国动物卫生与流行病学中心黄保续研究员、北京市公共卫生信息中心谢学勤研究员为专辑特邀责任编辑(Guest Editor)。

稿件格式参见《地球信息科学学报》投稿要求,投稿经由期刊网站提交,全文投稿截止期为2016年8月30日,拟于2016年下半年刊出专栏/专刊。

(本刊编辑部)