

DOI: 10.5846/stxb201903120469

薛瑞晖, 于晓平, 李东群, 叶新平. 基于地理加权回归模型探究环境异质性对秦岭大熊猫空间利用的影响. 生态学报, 2020, 40(8): - .

Xue R H, Yu X P, Li D Q, Ye X P. Using geographically weighted regression to explore the effects of environmental heterogeneity on the space use by giant pandas in Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

基于地理加权回归模型探究环境异质性对秦岭大熊猫空间利用的影响

薛瑞晖^{1,2}, 于晓平^{1,2}, 李东群³, 叶新平^{1,2,*}

1 陕西师范大学生命科学院, 西安 710119

2 陕西师范大学易科泰无人机遥感生态研究中心, 西安 710119

3 陕西周至老县城国家级自然保护区管理局, 西安 710400

摘要: 环境异质性对野生动物分布的影响具有明显的空间不均匀性。传统分析中多采用经典线性回归模型来量化野生动物分布与环境变量之间的关系, 难以准确反映物种—环境关系的空间异质特征。地理加权回归(GWR)是近年来提出的一种新的空间分析方法, 通过将空间结构嵌入线性回归模型中, 以此来探测空间关系的非均匀性。以秦岭大熊猫为例, 应用 GWR 模型分析大熊猫空间分布与环境异质性特征之间的潜在关系, 并同经典的全局最小二乘回归法(OLS)进行比较。结果表明, GWR 模型的 AIC、 R^2 和校正 R^2 均显著优于 OLS 模型, GWR 模型的局部回归系数估计能够更加深刻地揭示大熊猫空间分布与环境变量间的复杂空间关系, 且 GWR 模型能够为物种的科学保护提供更加有效的理论支撑。因此, GWR 模型可为探究物种—环境关系的空间异质特征提供一种新的方法, 在物种栖息地选择与利用研究中具有一定的应用前景。

关键词: 地理加权回归模型; 空间异质性; 景观格局; 大熊猫; 秦岭

Using geographically weighted regression to explore the effects of environmental heterogeneity on the space use by giant pandas in Qinling Mountains

XUE Ruihui^{1,2}, YU Xiaoping^{1,2}, LI Dongqun³, YE Xinping^{1,2,*}

1 College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 Research Center for UAV Remote Sensing, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

3 Shaanxi Zhouzhi Laoxiancheng National Nature Reserve, Xi'an 710400, China

Abstract: The effects of environmental heterogeneity on the distribution of wildlife are obviously uneven over space. Traditional approaches, such as classical linear regression model, are unable to accurately depict the spatial variations in species-environment relationship. Geographically weighted regression (GWR) is a newly proposed spatial regression method that shows promise in detecting spatial variability of environmental relationship through embedding spatial structure into linear regression model. Taking giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) in Qinling Mountains as an example, we used the GWR method to analyze the potential relationship between the spatial distribution of giant pandas and environmental heterogeneity. We also compared the results of GWR with those of the classical global ordinary least squares regression (OLS). The results show that AIC, R^2 and adjust R^2 of GWR model were significantly better than those of OLS model. Local regression coefficients of GWR model can reveal the complex spatial relationship between the spatial distribution of giant pandas and environmental variables, and provide more effective theoretical support for the scientific protection of species.

基金项目: 国家自然科学基金项目(3167120136); 国家重点研发计划专项(2016YFC0503200)

收稿日期: 2019-03-12; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yexinping@snnu.edu.cn

Therefore, the GWR is an effective tool for exploring the spatial heterogeneity of species-environment relationship, which would have a wide application prospect in the research of species habitat selection and utilization.

Key Words: geographically weighted regression; spatial heterogeneity; landscape pattern; giant panda; Qinling Mountains

野生动物的分布受到其栖息区域景观空间格局的显著影响^[1]。景观空间格局既是景观异质性本身的具体体现,又是野生动物栖息地生境特征的有效反映^[1]。因此,了解景观空间格局特征对野生动物空间利用的影响,对物种的科学保护和有效管理有着重要的意义^[2],已有的景观格局与野生动物分布关系的研究多借助于景观指数对景观格局进行量化,然后采用传统的线性回归模型等方法定量分析景观格局对野生动物分布的影响^[3-9]。然而,生态学关系的空间异质性或空间非均匀性(即变量间的关系或结构会随着地理位置的变化而改变),是空间分析中一个普遍存在的现象^[10]。传统线性回归模型,如普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)模型,将自变量与因变量的关系视为全局不变,得到的回归参数是整个研究区域内的平均值,从而忽略了两者的空间变异性所导致的关系变化,并因此造成回归模型有效性降低和预测结果失效等问题^[10,11]。

地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)模型是传统回归分析方法的扩展,是探索空间关系异质性方面有效工具之一^[10]。GWR 模型是一种典型的局部空间回归模型,通过将全局参数分解成局部参数进行估计,对每一个空间位置点的参数进行估计时考虑了非平稳性的关系,因此能深刻解释地理空间数据的某类指标和影响因子之间的空间非平稳性关系,这是传统 OLS 模型无法比拟的^[12,13]。近年来,许多学者对 GWR 模型进行了研究,主要集中在应用 GWR 模型分析社会环境因子对区域经济、区域房价和区域污染等方面的研究^[14-18],如关伟等^[14]运用 OLS 和 GWR 模型分析东北地区旅游经济和旅游产业因子、消费因子、投资因子之间的关系,发现 GWR 模型拟合优度比 OLS 模型有显著提高。陈辉等^[17]采用 GWR 模型构建了我国区域范围内近地表的 PM_{2.5}遥感反演模型,结果表明 GWR 模型既能体现 PM_{2.5}时空分布的全局变化特征,又能体现局部空间异质性。陈强等^[18]基于 GWR 模型评估了土地利用对地表水质的影响,其结果也证明 GWR 模型在预测精度和处理空间自相关过程中都要优于 OLS 模型。然而,在野生动物栖息地选择与利用研究领域, GWR 方法尚未得到应用。

大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)是中国乃至世界野生动物保护的旗舰物种,是中国特有珍稀濒危物种^[19,20]。近年来应用景观生态学原理与方法对大熊猫的研究很多,内容涉及生境适宜性评价、潜在栖息地分布模拟、景观连通性分析及栖息地景观破碎化等^[21-26]。这些研究主要是利用景观格局指数描述大熊猫栖息地特征,或者使用传统线性回归方法分析景观格局对大熊猫的影响,很少有研究涉及从整体到局部探讨环境因子对大熊猫空间分布的影响。本文结合前人的研究结果,采用 GWR 方法探讨环境异质性对秦岭大熊猫空间分布的影响,并通过与传统的 OLS 分析方法进行比较,检验 GWR 模型在大熊猫栖息地空间分析中是否可用,以期提高大熊猫—环境空间关系的科学理解,为进一步开展大熊猫等野生动物的栖息地选择与利用精准量化分析和评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究区域介于北纬 33°7′—34°6′、东经 106°21′—108°54′和海拔 376—3770 m 之间,属于我国传统南北地理分界线的秦岭中段地区,辖陕西省 17 个县部分区域,且包含 19 个自然保护区,面积约为 2 万 km²(图 1)。该研究区属于季风气候,是北亚热带和暖温带的过渡区,是长江和黄河的分水岭,同时包含秦岭山地、低山丘陵和平原等一系列地貌类型,是我国生物多样性和生态系统类型最为丰富的地区之一。秦岭大熊猫主要分布在秦岭中段南坡,北坡和西段有少量分布^[27]。总体上为两块相隔较远的区域,其西端的宁强县和甘肃康县、

四川青川连成一片;佛坪、太白、洋县、周至、宁陕、留坝、城固、户县和镇安 9 县的分布区相隔较近或连成一片,分布区域横跨长江、黄河水系^[27]。

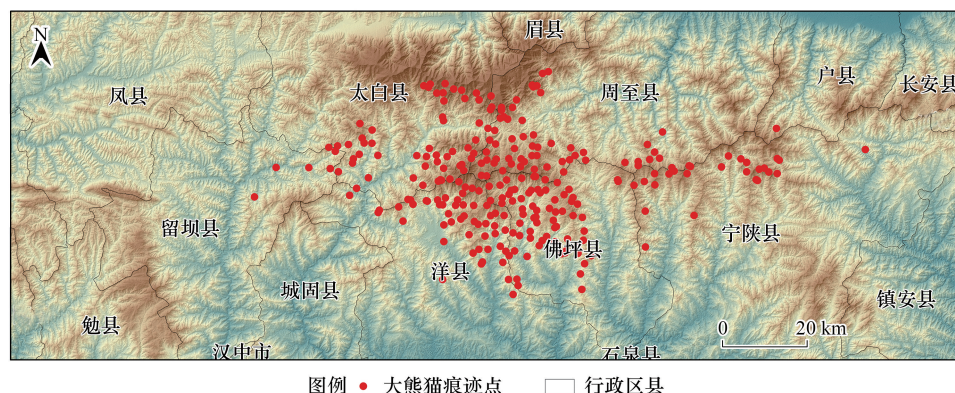


图 1 研究区域 DEM 及大熊猫分布点示意图

Fig.1 Map of the study area with DEM and panda distribution records (red points)

1.2 数据来源及处理

本研究所采用的秦岭大熊猫分布数据来源于 1999—2002 年全国第三次大熊猫调查数据。根据秦岭大熊猫平均家域面积为 10.62 km^2 ^[28],为避免空间自相关影响模型预测,剔除距离小于 2 km 的冗余痕迹点,最终保留 267 个大熊猫分布痕迹点进入分析(图 1 红点所示)。鉴于 OLS 与 GWR 建模要求使用连续型数值变量,我们利用 ArcGIS 10.2 软件的核密度(Kernel Density)分析功能估计了每一个大熊猫分布点所在位置的大熊猫分布相对密度。

研究区的数字高程模型(DEM)数据源于美国 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 30 m 精度数据;公路和居民点 GIS 数据源于中国科学院资源环境科学数据中心的国家基础矢量数据集数据;土地覆盖/利用数据源于中国土地利用现状遥感监测数据库 2000 年土地利用 30 m 精度数据(<http://www.resdc.cn>),该数据集的土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地等 6 个一级类型和包括有林地、灌木林、疏林地等 25 个二级类型,数据分类精度均可达到 85% 以上^[29]。参考以往大熊猫生态学方面的研究^[21-26],本研究选取了有林地、农田、灌草地等三类与大熊猫分布相关的土地覆盖类型进入下一步景观空间格局量化分析。

1.3 环境变量筛选

本研究选取了以下 3 个方面的环境因素来分析大熊猫空间分布与环境异质性之间的关系:1) 地理特征(包括海拔和坡度);2) 人类影响(包括距离道路的距离和距离居民点的距离);3) 景观格局特征(包括最大斑块指数、边缘密度、斑块面积、连接度指数和聚合度指数)^[30]。每一个大熊猫分布点处的人类影响因素通过 ArcGIS 10.2 软件中的距离量算功能计算距离道路和居民点的最近距离。大熊猫分布点处的景观指数值是在 Fragstats 4.0 软件中选择 User provided points 模块,设置搜索半径为 3 km 计算完成的^[30]。为避免景观指数值的空间自相关,本文利用 R 3.3.2 软件对所提取景观格局指数值进行因子分析,通过变量间的相关关系剔除信息严重冗余变量,将特征值 > 0.8 的变量保留,特征值 < 0.3 的变量移除^[30],最终选择农田斑块面积(Cropland-CA)、有林地斑块面积(Forest-CA)和灌草地斑块面积(Grassland-CA)等独立的景观变量作为模型变量参与下一步的模型运算。最终进入建模分析的环境变量见表 1。

1.4 模型建立与评价

本研究首先选用经典的 OLS 进行建模。通过 OLS 建模,既可以初步了解变量间的相互关系,也可以评估 OLS 对空间数据的建模效果,进而确定是否选择 GWR 进一步建模。本文所有的模型分析在 GWR 4.0 软件中

完成。

表 1 本研究模型分析中所用的环境因素及变量

Table 1 The environmental factors and variables used in the analysis of this research

环境因素 Environmental factors	变量名 Variable name	变量描述 Variable description
地理特征 Geographical features	海拔 DEM/m	大熊猫痕迹点所在位置的海拔高度。
	坡度 Slope/(°)	大熊猫痕迹点所在位置的坡度。
人类影响 Anthropogenic influence	距离道路的距离 Road-distance/m	大熊猫痕迹点距最近道路的距离。
	距离居民点的距离 Resident-distance/m	大熊猫痕迹点距最近居民点的距离。
景观格局特征 Landscape pattern characteristics	农田斑块面积 Cropland-CA/(hm ²)	大熊猫痕迹点周围 3 km 范围内农田斑块的面积。
	有林地斑块面积 Forest-CA/(hm ²)	大熊猫痕迹点周围 3 km 范围内有林地斑块的面积。
	灌草地斑块面积 Grassland-CA/(hm ²)	大熊猫痕迹点周围 3 km 范围内灌草地斑块的面积。

1) OLS 建模。OLS 是一种对因变量和解释变量之间相互关系进行研究的统计方法,是所有空间回归分析的起点,假设线性回归关系满足全局空间平稳条件,其公式如下:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, Y_i 是第 i 点因变量的值, β_0 为截距, X_{ik} 为第 k 个解释变量在第 i 点的值, β_k 为第 k 个解释变量的斜率或回归系数, ε_i 为残差。

2) GWR 建模。GWR 是 Fotheringham 等在传统 OLS 模型基础上将数据的地理位置加入回归参数中,同时考虑了相邻点的空间权重,允许局部参数估计的地学统计方法^[31,32]。其公式如下:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, \nu_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, (μ_i, ν_i) 是第 i 点的空间位置, $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 是连续函数 $\beta_k(\mu, \nu)$ 在 (μ_i, ν_i) 处的值。

由于大熊猫的分布在空间上呈集聚分布,故 GWR 模型采用调整型的空间核和 Gaussian 权重函数,以 AICc 作为衡量标准,通过黄金分割搜索(Golden section search)方法来确定最佳带宽,也就是说,使得 AICc 最小的带宽即为最佳带宽。

3) 模型评价。为了比较 OLS 模型和 GWR 模型的拟合效果,选择修正的 AIC 信息准则(Akaike, 1973)作为模型评价指标,其公式如下:

$$AIC_C = 2n \ln(\sigma) + n \ln(2\pi) + n \left(\frac{n + \text{tr}(S)}{n - 2 - \text{tr}(S)} \right) \quad (3)$$

式中, n 表示观测值数量; σ 表示误差项估计的标准差; $\text{tr}(S)$ 表示 GWR 模型 S 矩阵的迹,是带宽的函数。一般情况下,具有较小 AIC_C 值的模型拟合效果相对较好。若两个模型间的 AIC_C 差 > 3,则表明两个模型之间具有明显差异,具有较小 AIC_C 值的模型拟合度更优。此外,还可以通过计算模型的残差标准差(Sigma)来比较 OLS 模型和 GWR 模型, Sigma 值越小,表示模型的拟合效果越好。

2 结果与分析

2.1 最小二乘法(OLS)模型分析

以大熊猫相对分布密度为因变量建立 OLS 回归方程结果表明(表 2、图 2),大熊猫分布相对密度与森林面积占比和灌草地面积占比呈显著相关关系,与海拔和距离道路距离也呈现出一定的相关性。各解释变量的方差膨胀因子(VIF)均小于 7.5,表明各变量间共线性对模型的影响不显著。OLS 模型的 R^2 为 0.152,表明模型的拟合度不理想。OLS 模型残差的全局 Moran's I 系数为 0.16, Z-score 为 10.44,说明残差项还存在空间自相关性。以上说明,OLS 对数据空间信息的提取还不完全,不能很好地解释大熊猫空间分布密度与环境影响因素的空间非均匀性。

表 2 OLS 模型参数估计及检验结果
Table 2 Parameter estimation and test results of the OLS model

变量 Variable	回归系数 Coef.	标准误 SE	t 统计量 t-stat.	P	方差膨胀因子 Variance inflation factor(VIF)
坡度 Slope	-0.025	0.058	-0.441	0.660	1.019
海拔 Digital elevation model(DEM)	0.146	0.083	1.749	0.081 *	2.114
距离居民点的距离 Resident-distance	0.118	0.078	1.516	0.131	1.852
距离道路的距离 Road-distance	0.129	0.066	1.955	0.052 *	1.318
农田斑块面积 Cropland-CA	-0.112	0.080	1.408	0.160	1.924
有林地斑块面积 Forest-CA	0.371	0.162	2.295	0.023 **	6.948
灌草地斑块面积 Grassland-CA	0.246	0.116	2.120	0.035 **	4.112

***、**、* 分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验

2.2 地理加权回归(GWR)模型分析

使用与 OLS 模型相同的变量构建 GWR 模型,依据最小 AIC 值确定最佳带宽为 107 获得各变量系数分布(表 3、图 3),可以看到,森林面积占比和灌草地面积占比等变量的参数估计值在 OLS 方法下是正值,但在 GWR 方法下则有正有负,说明各环境变量对大熊猫空间分布的影响呈现出空间不均匀性。

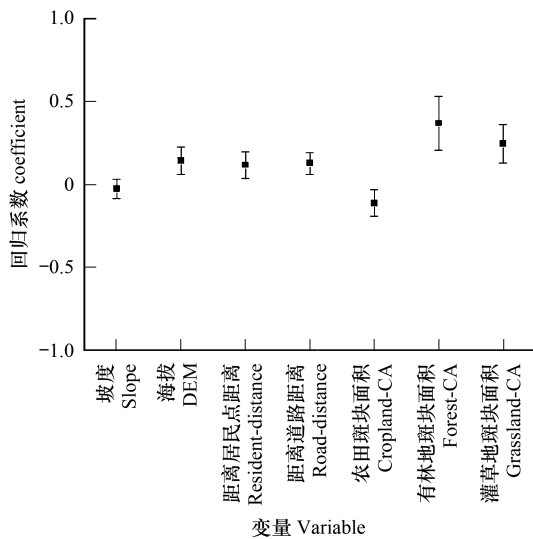


图 2 OLS 模型影响因子回归系数
Fig.2 OLS model influence factor regression coefficient

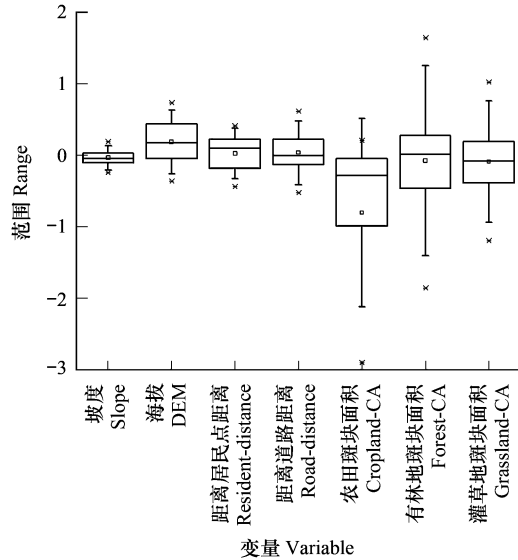


图 3 GWR 模型影响因子回归系数
Fig.3 GWR model influence factor regression coefficient

表 3 GWR 模型参数估计及检验结果
Table 3 Parameter estimation and test results of the GWR model

变量 Variable	最小值 Min	最大值 Max	下四分位数 Lwr Quartile	中位数 Median	上四分位数 Upr Quartile
坡度 Slope	-0.241	0.192	-0.105	-0.046	0.033
海拔 Digital elevation model(DEM)	-0.361	0.735	-0.046	0.181	0.441
距离居民点的距离 Resident-distance	-0.434	0.416	-0.179	0.101	0.227
距离道路的距离 Road-distance	-0.523	0.620	-0.131	-0.004	0.232
农田斑块面积 Cropland-CA	-2.903	0.208	-0.989	-0.281	-0.044
有林地斑块面积 Forest-CA	-1.852	1.647	-0.462	0.011	0.282
灌草地斑块面积 Grassland-CA	-1.190	1.028	-0.386	-0.076	0.192

GWR 模型与 OLS 模型相比(表 4), GWR 模型的 R^2 达到了 0.468, 且与 OLS 模型的 AICc 之差远大于 3 ($\Delta AICc = 24.401$), 说明 GWR 模型的拟合度明显高于 OLS 模型; GWR 模型残差的方差分析结果显示, GWR 模型的残差平方和 (Residuals SS) 下降了 84.088, 亦表明 GWR 模型的拟合效果比 OLS 模型有很大改善 (Residuals F = 2.368); GWR 模型残差的 Moran's I 系数为 0.09, Z-score 为 6.08, 说明残差不存在空间自相关。综上, 结果表明 GWR 模型比 OLS 模型模拟的效果要好。

表 4 GWR 模型和 OLS 模型比较

Table 4 Comparison of model performance between the GWR and OLS models

模型参数 Model parameters	修正 AIC AICc	拟合优度 R^2	调整拟合优度 Adjusted R^2	残差平方和 Residuals SS	残差自由度 Residuals DF	残差均方 Residuals MS	残差检验 Residuals F
OLS 模型 OLS model	733.490	0.152	0.122	225.518	258.000	—	—
GWR 模型 GWR model	709.089	0.468	0.311	141.430	206.221	0.686	2.368

2.3 影响因子空间分异特征举例分析

GWR 模型是局部模型, 在每个样本数据点都有一组局部的参数估计, 而不像 OLS 模型那样是一个全局或平均意义上的估计值。因此, 我们对 GWR 模型的局部参数估计值使用 IDW 方法进行空间插值, 得到各环境变量的局部参数估计的空间格局图(图 4), 以此展示各环境变量对大熊猫分布影响的空间分异特征。

如图 4 所示, 距居民点距离对大熊猫相对分布密度的影响作用自西向东呈递增趋势, 形成以凤县、勉县、留坝县、城固县、太白县和洋县西北部为主的低值区和以周至县和佛坪县为主的高值区; 距道路距离对大熊猫相对分布密度的影响作用从中心向四周呈圈层递增趋势, 形成以太白县东南部、周至县西南部、佛坪县西北部和洋县东北部为主的低值区和以凤县、城固县、留坝县、勉县和略阳县为主的高值区格局; 而有林地面积占比对大熊猫分布相对密度的影响作用从中心向四周呈圈层递增趋势, 形成以周至县南部和佛坪县北部为主的低值区和以城固县为主的高值区格局, 表明有林地斑块面积占比对周至县南部和佛坪县北部的大熊猫核心分布区域的相对分布密度的影响作用不明显。

3 讨论

本研究分别应用 OLS 模型和 GWR 模型分析了环境异质性与大熊猫空间分布之间的关系, 并将两者的模拟结果进行比较, 证明 GWR 模型对于刻画大熊猫空间分布与景观格局之间的关系具有独特的空间非平稳性和尺度依存特性优势。OLS 模型中多采用全局空间回归模型量化大熊猫分布与环境变量之间的关系, 得到的回归参数估计是在整个研究区域内的平均值, 不能反映物种-环境关系的空间异质特征; 而 GWR 模型允许将全局参数的估计分解成局部参数进行估计, 在模拟精度和空间特征提取上都显著优于 OLS 模型, 模型的结果可反映环境变量的影响具有空间非均匀性, 这是传统 OLS 模型无法实现的。

参考已有大熊猫与环境异质性之间关系的研究^[21-26], 本文的 GWR 分析结果进一步说明环境异质性对大熊猫空间利用的影响呈现出明显的空间非平衡性, 不同区域大熊猫空间分布与主导因子发生作用的特征尺度也不同。例如, 有林地斑块面积对大熊猫相对分布密度的影响作用从中心向四周呈圈层递增趋势, 形成以周至县南部和佛坪县北部为主的低值区和以城固县为主的高值区格局, 表明有林地斑块面积对周至县南部和佛坪县北部的大熊猫核心分布区域的相对分布密度的影响作用不明显, 而对城固县大熊猫相对分布密度的影响作用要大于其他区域。距离道路距离对大熊猫相对分布密度的影响作用从中心向四周呈圈层递增趋势, 形成以太白县东南部、周至县西南部、佛坪县西北部和洋县东北部为主的低值区和以凤县、城固县、留坝县、勉县和略阳县为主的高值区格局, 说明道路对凤县、城固县、留坝县、勉县和略阳县大熊猫相对分布密度的影响作用要大于其他区域, 这就要求我们保护区管理规划者要格外注意对不同区域采用整体和局部相结合的办法, 做到因地制宜, 提升保护措施有效性。

虽然 GWR 模型在理解野生动物空间分布与环境异质性之间的空间关联具有很大优势, 但模型本身也存

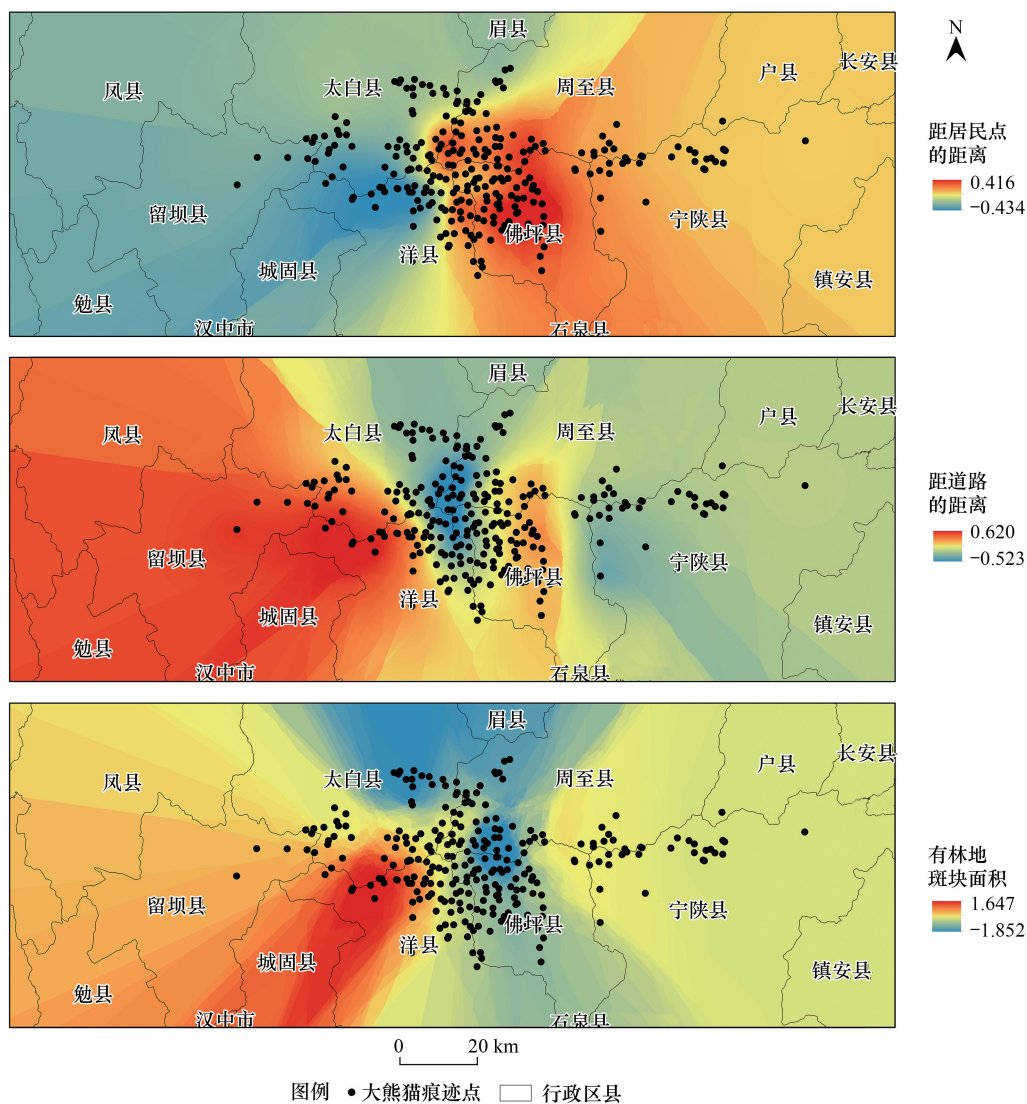


图4 第三次大熊猫调查 GWR 模型影响因子回归系数空间分布

Fig.4 The third giant panda survey GWR model influence factor regression coefficient spatial distribution

A: 距居民点距离对大熊猫相对分布密度的影响; B: 距道路距离对大熊猫相对分布密度的影响; C: 有林地斑块面积对大熊猫相对分布密度的影响

在一些不足之处。首先,由于回归模型对环境变量数依赖性较大,当环境变量数较少时,难以建立合理的回归模型,对因变量的预测不准确;而当环境变量数较多时,又会产生多重共线性,同样使得结果出现不确定性。其次,GWR 模型不支持类型变量的加入,如土地利用类型和保护地类型等,而野生动物空间分布却受这些类型要素的影响较大,忽视重要的类型变量会降低模型预测精度。如何将类别变量合理的应用到 GWR 模型中还需要进一步研究。此外,本研究仅分析了大熊猫空间分布与部分环境因子之间的回归关系,实际上,除了这些环境因子之外诸多环境因子也影响着大熊猫的空间分布,如气候、水域和食物等。下一步工作将把这些环境因子融合到 GWR 模型中,以期得到更为全面客观的分析结果。

4 结论

本文基于地理加权回归模型(GWR)和普通最小二乘法线性回归模型(OLS)探究了环境异质性对秦岭大熊猫空间利用的影响,并对模型模拟结果进行了比较。主要结论如下:

(1) GWR 模型可解释环境异质性对大熊猫空间利用影响的 46.8%, 优于 OLS 模型的 15.2%。

(2) GWR 模型适用于野生动物分布与环境变量之间关系的建模分析, 能有效的刻画野生动物分布与环境变量之间的空间异质性, 可为探究物种—环境关系的空间异质特征提供一种新的思路和方法。

(3) 大熊猫空间分布具有明显的空间异质性特征, 不同环境因子对大熊猫空间分布影响的作用不同, 现有大熊猫空间分布格局受多重因素综合影响。

致谢: 本研究是由国家自然科学基金项目(3167120136)和国家重点研发计划专项(2016YFC0503200)资助的。感谢陕西省林业局、陕西周至老县城自然保护区以及陕西佛坪自然保护区相关人员的技术支持。

参考文献(References):

- [1] 李哈滨, Franklin J F. 景观生态学——生态学领域的新概念构架. 生态学进展, 1988, 5(1): 23-33.
- [2] Bennett A F, Radford J Q, Haslem A. Properties of land mosaics: implications for nature conservation in agricultural environments. Biological conservation, 2006, 133(2): 250-264.
- [3] 贺超, 鲁莎莎, 周灵国, 张晓锋, 温亚利. 人类活动对秦岭大熊猫栖息地景观格局的影响. 林业经济评论, 2014, 5(1): 9-17.
- [4] 潘星, 李维庆, 翟亮, 张志强, 彭义. 熊猫栖息地景观格局变化分析与优化技术初探. 测绘科学, 2016, 41(4): 61-65, 96-96.
- [5] 范隆庆, 董岚, 张顺林, 冉江洪, 岳碧松. 凉山山系大熊猫栖息地的景观格局. 应用与环境生物学报, 2010, 16(2): 179-184.
- [6] 张爽, 刘雪华, 靳强, 李纪宏, 金学林, 魏辅文. 秦岭中段南坡景观格局与大熊猫栖息地的关系. 生态学报, 2004, 24(9): 1950-1957.
- [7] 张文广, 胡远满, 胡锦矗, 刘森, 朱教君, 胡志斌. 四川省汶川县土地利用变化对森林野生动物生境的影响. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1985-1989.
- [8] 刘丙万, 秦立鑫, 张博, 刘松涛. 内蒙古达赉湖地区蒙原羚生境景观格局及动态研究. 野生动物, 2011, 32(5): 256-259.
- [9] 邓凯, 李丽, 吴巩固, 周跃, 赵如. 景观空间格局对滇金丝猴群分布的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 4999-5006.
- [10] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] 杨毅. 顾及时空非平稳性的地理加权回归方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [12] 汤庆园, 徐伟, 艾福利. 基于地理加权回归的上海市房价空间分异及其影响因子研究. 经济地理, 2012, 32(2): 52-58.
- [13] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 383-401.
- [14] 关伟, 郝金连. 东北地区旅游经济影响因素时空特征研究. 地理科学, 2018, 38(6): 935-943.
- [15] 王莉, 胡精超. 基于地理加权回归(GWR)模型对国民体质与社会、自然因素关系的分析. 吉林体育学院学报, 2017, 33(6): 15-21.
- [16] 吕萍, 甄辉. 基于 GWR 模型的北京市住宅用地价格影响因素及其空间规律研究. 经济地理, 2010, 30(3): 472-478.
- [17] 陈辉, 厉青, 张玉环, 周春艳, 王中挺. 基于地理加权模型的我国冬季 PM_{2.5} 遥感估算方法研究. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2142-2151.
- [18] 陈强, 朱慧敏, 何溶, Dahlgren R A, 张明华, 梅琨. 基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1571-1580.
- [19] 何静平. 国家重点保护野生动物名录. 北京: 中国林业出版社, 1989(2): 48-48.
- [20] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录-第二卷-脊椎动物. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [21] 张文广, 唐中海, 齐敦武, 胡远满, 胡锦矗. 大相岭北坡大熊猫生境适宜性评价. 兽类学报, 2007, 27(2): 146-152.
- [22] 戎战磊, 周宏, 韦伟, 张晋东, 谌利民, 张泽钧. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 269-273, 278-278.
- [23] 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.
- [24] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 谭迎春, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. 生态学报, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [25] 朱栩逸. 基于 RS 与 GIS 的卧龙自然保护区大熊猫生境适宜性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [26] 陈利顶, 刘雪华, 傅伯杰. 卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究. 生态学报, 1998, 19(3): 291-297.
- [27] 周灵国. 秦岭大熊猫——陕西省第四次大熊猫调查报告. 西安: 陕西科学技术出版社, 2017.
- [28] 潘文石. 继续生存的机会. 北京: 北京大学出版社, 2001.
- [29] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229-239.
- [30] Wang T J, Ye X P, Skidmore A K, Toxopeus A G. Characterizing the spatial distribution of giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) in fragmented forest landscapes. Journal of Biogeography, 2010, 37(5): 865-878.
- [31] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunson C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. Environment and Planning A: Economy and Space, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [32] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298