

DOI: 10.5846/stxb201809091928

高艺宁, 赵萌莉, 王宏亮, 熊梅, 赵天启. 景观生态视角下草地生态质量的时空差异及其影响因素——以内蒙古四子王旗为例. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Gao Y N, Zhao M L, Wang H L, Xiong M, Zhao T Q. Analysis of spatial differentiation of grassland ecological quality and its affecting factors based on landscape ecology perspective: A case study of Siziwang Banner. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

景观生态视角下草地生态质量的时空差异及其影响因素

——以内蒙古四子王旗为例

高艺宁¹, 赵萌莉^{1,*}, 王宏亮^{2,3}, 熊梅¹, 赵天启¹

1 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019

2 内蒙古大学公共管理学院, 呼和浩特 010010

3 呼和浩特市国土资源局, 呼和浩特 010010

摘要: 科学评价北方荒漠草原的生态质量, 有助于草地景观的生态修复与荒漠化防治。本文以内蒙古四子王旗为例, 采用景观生态视角, 通过构建生态质量评价体系, 结合综合指数法和自然间断法, 对研究区内 130 个行政村域的草地生态质量进行综合评价及类别划定; 通过引入地理加权回归模型并对比最小二乘回归模型, 评估外源压力对草地生态质量的影响。结果表明: (1) 2016 年四子王旗村域草地生态质量的指数变化幅度为 0.003—0.765, 呈现出北高南低的区域差异; 在空间分布上, 高高集聚、低低集聚和低高集聚的空间特征反映出村域草地生态质量的非均衡特征及空间依赖; (2) 对比模型估计参数, 地理加权回归模型具有解释草地生态质量空间异质性和处理数据非平稳性的优势, 预测精度优于最小二乘回归模型; (3) 6 种变量对草地生态质量的回归系数表明, 经济压力和环境压力的影响效应明显高于人口压力和资源压力。与草地生态质量变化呈正相关的因素依次为: 生态用地比、人均耕地面积和草地载畜量, 而与至城镇中心距离、劳动人口比和人均 GDP 则依次呈现出负相关关系。研究结果可为草地生态保护与治理提供参考。

关键词: 荒漠草地; 生态质量; 空间差异; 影响因素; 四子王旗

Analysis of spatial differentiation of grassland ecological quality and its affecting factors based on landscape ecology perspective: A case study of Siziwang Banner

GAO Yining¹, ZHAO Mengli^{1,*}, WANG Hongliang^{2,3}, XIONG Mei¹, ZHAO Tianqi¹

1 College of Grassland Resources and Environment, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, China

2 School of Public Management, Inner Mongolia University, Hohhot 010010, China

3 Hohhot Land and Resources Bureau, Hohhot 010010, China

Abstract: Scientific evaluation of ecological quality of desert steppe in North China is helpful for ecological restoration and desertification control. Taking Siziwang Banner as an example, this paper adopts the landscape ecological perspective, constructs the ecological quality evaluation system, and combines the comprehensive index method to research grassland ecological quality. In this paper, grassland ecological quality of desert steppe in 130 administrative villages is comprehensively evaluated and classified with the natural breaking method. After comparing the ordinary least square regression model, the effect of exogenous pressure on grassland ecological quality was evaluated by introducing the

基金项目: 国家自然科学基金项目(31861143001, 31660108)

收稿日期: 2018-09-09; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nmglmzh@126.com

geographical weighted regression model. The main results were as follows: (1) The grassland ecological quality indexes ranged from 0.003 to 0.765 in the village area of Siziwang Banner, showing the regional difference in north high to south low in 2016. The spatial characteristics of High-High agglomeration, Low-Low agglomeration and Low-High agglomeration reflect the disequilibrium characteristics and spatial dependence. (2) The GWR model has the advantage of explaining spatial heterogeneity and processing data nonstationarity of grassland ecological quality. Compared with the estimated parameters, the prediction accuracy of the GWR model is higher than the OLS model. (3) The regression coefficient of six variables on grassland ecological quality showed that the effect of economic pressure and environmental pressure was obviously higher than that of population pressure and resource pressure. (4) The positive correlation factors of the change of grassland ecological quality are as follows: ecological land ratio, per capita amount of farmland and grassland grazing capacity. The distance from the nearest town, labor to force ratio and per capita GDP showed a negative correlation in turn. The results can be used as reference to grassland ecological protection and management.

Key Words: Desert grassland; Ecological quality; Spatial differentiation; Affecting factors; Siziwang Banner

景观是空间上广阔而又异质的复杂系统,自然生态系统的复杂特征与非线性科学需要借助景观生态学加以阐明和检验^[1-2]。作为陆地生态系统的重要组成,草地生态系统为人类提供了多种生态产品和功能服务,包括净初级物质生产、碳蓄积与碳汇、调节气候、涵养水源、水土保持、防风固沙、改良土壤以及维持生物多样性等^[3-4]。但由于超载过牧、违规采矿等不合理的资源利用^[5-6],导致原本脆弱的草地生态系统不断受到冲击,直接造成草地退化、草产量减产以及牧草品质下降等生态问题,并从根本上改变草地生态系统的结构与功能,严重威胁农牧地区的生态安全^[7]。有效保育及可持续利用的草原生态,是维持区域生态系统格局、功能和农牧业可持续发展的关键^[8]。就草地生态系统而言,草地生态质量评价^[9]能够反映生态系统的结构与功能,反馈对抗外源干扰所呈现出的格局状态,是衡量草地生态系统稳定程度的重要方面。因此,科学开展草地生态质量评价及其影响因素分析,有助于探讨人为干扰下草地生态质量空间差异的响应,为改善草地生态系统环境和防治草原荒漠化提供理论基础。

随着自然资源与生态建设关注度的不断升温,草地生态质量逐渐纳入学者的研究视野。查阅已有文献发现,关于生态质量的研究诸以耕地^[10-11]、森林^[12-13]、湿地^[14-16]、海域^[17-18]以及乡村景观^[19]等方面为主,而以草地为主题的生态质量研究却并不多见。现有相关研究主要侧重于草地生态质量指标体系的构建^[20-21]、草地生态质量的基本框架与评价方法^[22-23]以及草地生态质量的动态变化^[9]等,其研究内容上多以理论综述为主,定量化分析较少;研究方法通常采用分级评价法^[21]、动态评价法^[23]以及综合指数法^[24],研究方法相对局限;在研究地域上,多以青藏高原自然保护区为主,较少关注生态脆弱的荒漠草原区;研究尺度多以流域、区域或省域等大尺度为主,缺少村域等中小尺度的研究^[25]。值得说明的是,在以传统生态学或统计学为基础的生态质量评价中,学者们很少考虑自然要素在空间分析中尺度选择的适用性,也极少关注空间变量的数据质量和精度验证^[26]。事实上大部分地区的景观生态问题是以行政村为载体而发生的,且由于空间数据的非平稳性和空间依赖^[27-28],对于草地生态质量在村域尺度上形成的空间差异影响较大。因此,本研究基于中尺度空间显示的景观生态学方法,采用综合指数法评价草地生态质量并划分类型,引入地理加权回归模型并对比最小二乘回归模型的估计参数后,评估外源压力对草地生态质量的影响。

荒漠草原区位于我国北方生态安全屏障的核心区域,草地是当地特有的生态景观。气候条件的恶劣、风沙环境的侵蚀以及草原生态的敏感,致使该区草地景观呈现出明显的破碎、退化及同质化。本文所研究的四子王旗位于荒漠草原带,该区既是京津风沙源治理工程的实施县,也是草原禁牧补偿推行的示范区,承载着国家生态安全与生态保育的重要功能。鉴于此,本文选择典型荒漠草原区的四子王旗作为研究案例开展上述相关研究。

1 研究区概况

四子王旗隶属于内蒙古乌兰察布市境内,地理坐标为 $110^{\circ}19'53''$ — $112^{\circ}59'37''$ E 和 $41^{\circ}11'32''$ — $43^{\circ}22'31''$ N,东与锡林郭勒盟苏尼特右旗毗邻,南与呼和浩特市武川县交界,西与包头市达尔罕茂明安联合旗相连,北与蒙古国接壤,辖区总面积为 24036km^2 ,现有草地面积为 20516km^2 ,林地面积为 1235km^2 ,耕地面积为 1417km^2 ,建设用地面积为 125km^2 ,沙化荒漠面积为 738km^2 ,其中草地为优势地类,约占土地总面积的 85.36%。截止 2016 年末,四子王旗的国民生产总值为 57.4 亿元,其中,农业总产值约为 15 亿元,工业总产值为 19.2 亿元,三大产值比例为 15:19:23,人均地区生产总值为 26959 元,全旗总人口数为 213129 人,年牧业牲畜存栏数为 161.93 万头。全旗现有乡镇、苏木及国有牧场共 13 个,有行政村或嘎查共 130 个。由于地处温带,属典型大陆性干旱气候,该旗全年日平均气温为 3.6°C ,平均海拔为 1400 m。四子王旗全境丘陵起伏,平原相间,南部为山地丘陵,北部为荒漠草原。

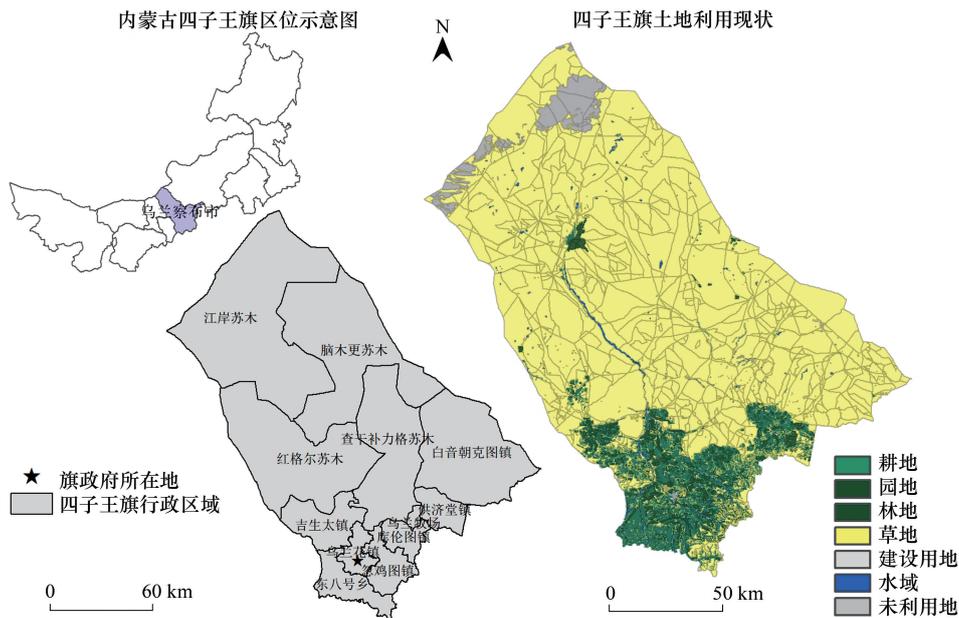


图1 内蒙古四子王旗区位及土地利用现状图

Fig.1 Map of location and land use of Siziwang Banner in Inner Mongolia

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 草地生态质量评价

(1)构建评价指标体系。草地生态质量取决于草地生态系统结构和功能 2 个方面。草地生态质量不断变化的原因,既有来自生态系统内部自愈能力的影响,又受到系统外部人为因素的干扰^[26]。通过分析草地生态系统结构和功能的稳定性与脆弱性,客观评价研究区草地生态质量。基于此,本文从稳定性和脆弱性 2 个方面,结合已有对生态质量的相关研究^[29-30],构建四子王旗草地生态质量评价体系(表 1)。

(2)指标处理。为消除指标之间的量纲差异,需对所选指标进行标准化处理。文中采用极差法对稳定性和脆弱性各类指标进行标准化处理。稳定性指标值为越大越好,脆弱性指标值为越小越好。式中, R_{ij} 为指标标准化值; X_{ij} 为指标值, $X_{j\min}$ 和 $X_{j\max}$ 分别为第 j 个指标的最小值和最大值。

$$R_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (1)$$

(3)权重确定。本文采用熵权法计算各指标的权重。

$$W_j = (1 - H_j) / (m - \sum_{j=1}^m H_j) \quad (2)$$

$$H_j = -K \sum_{j=1}^n P_j \ln P_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (R_{ij} / \sum_{j=1}^n R_{ij}) \ln (R_{ij} / \sum_{j=1}^n R_{ij}) \quad (3)$$

式中, W_j 为指标权重, H_j 为第 j 项指标的熵, n 为草地按村域划分的样本数, m 为稳定性或脆弱性分类下草地生态质量评价指标的项数, P_j 表示 j 项指标的出现概率, K 为玻尔兹曼常量; 熵为发生概率的度量, 当各项指标的发生概率相等时, 即 $P_j = 1/n$, H_j 取值最大, 此时熵最大。

(4) 草地生态质量综合指数测算。结合指标标准化值和权重值, 采用综合指数法测算四子王旗各村域草地生态质量。

$$GLES = \sum_{j=1}^n W_{GLES} \cdot R_{GLES} \quad (4)$$

$$GLEF = \sum_{j=1}^n W_{GLEF} \cdot R_{GLEF} \quad (5)$$

$$GLEQ = GLES / GLEF \quad (6)$$

式中, GLES 和 GLEF 分别代表草地生态质量分类中的稳定性和脆弱性; n 为样本数; GLEQ 代表草地生态质量评价指数。

(5) 草地生态质量分类。本文采用自然间断法^[31]对四子王旗各村域草地生态质量进行类型划分。该方法因其便于操作且处理速度快, 被学者广泛应用于生态系统评价当中。

表 1 景观生态视角的草地生态质量评价指标及其权重

Table 1 Evaluation index system and weights of grassland ecological quality based on landscape ecological perspective

类型 Type	指标 Index	权重 Weights	公式 Formula	描述 Description
稳定性 Stability	草地斑块密度	0.055	$\frac{N}{A} \times 100$	表征草地斑块的分布特征, 是描述草地景观空间格局的重要指标之一。N 为评价单元内草地斑块的数量; A 为评价单元区域总面积。
	景观植被指数	0.003	$\sum_{j=1}^6 (a_i \cdot W_i) / A$	表征植被覆盖状况。其中, a_i 为评价单元不同土地利用类型面积; i 分别代表林地、园地、耕地、牧草地和未利用地; 权重 W_i 为 0.28、0.22、0.2、0.15 和 0.1。
	景观蔓延度	0.006	$\left[1 + \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[p_i \cdot \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right] \right\} \cdot \frac{1}{2 \ln(m)} \right]$	描述景观中优势斑块类型的延展趋势。蔓延度越高说明景观中草地斑块具有良好的连接性; 蔓延度越低, 表明草地斑块延展性较差。 p_i 为斑块类型的景观占比; g_{ik} 为基于重复计算方法在斑块类型的 i 和 k 像素间的邻接数; m 为斑块类型的数量。
	景观结构指数	0.017	$\sum_{d=1}^6 \left[\sum_{d=1}^6 (g_d \cdot a_d) / A \right] \cdot W_d$	表征景观结构的稳定程度。根据景观生态的贡献程度对类型 g_d 赋值, 其中, 林地、园地、耕地、草地、水域及未利用地分别赋整数值 6—1, 对应权重 W_d 为 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 和 0.08; a_d 为类型面积。
	景观多样性	0.028	$-\sum_{b=1}^6 (P_b \cdot \ln P_b)$	景观多样性是基于信息理论的测量指数, 主要反映景观异质性, 对景观各斑块类型的非均衡分布状况较为敏感, 表征景观类型的多样化程度。其中, P_b 为景观类型 b 占评价单元面积的比例; b 为耕地、园地、林地、草地、水域及未利用地。
	景观邻近度	0.280	$\sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2}$	表征同类型斑块之间的邻近程度, 数值越小, 表明斑块之间离散程度高, 数值越大, 说明斑块间邻近度高。 a_{ijs} 为指定邻近斑块 ij 范围内的 ijs 的斑块面积; h_{ijs} 是斑块 ijs 之间距离, 是基于斑块边缘到边缘间的距离, 从一个像元中心到另一个像元中心进行计算。

续表

类型 Type	指标 Index	权重 Weights	公式 Formula	描述 Description
	景观优势度	0.058	$\frac{\max_{j=1}^n(a_{ij})}{A} (100)$	通过景观生态学中的最大斑块所占景观面积的比例来确定景观中草地类型的优势度。该值决定着草地景观中的生态特征,如草地优势程度以及内部种类的丰度。A 为研究区总面积; a_{ij} 为草地斑块 ij 的面积。
	景观分形维数	0.001	$\sum_{e=1}^n \frac{2\ln(0.25Z_e)}{\ln A}$	表征景观斑块镶嵌体的几何形状复杂性,反映人类活动对景观格局的影响。一般而言,受人类活动干扰小的自然景观的分形维数较高。其中, Z_e 为评价单元内的斑块周长; n 为斑块总数。
脆弱性 Vulnerability	景观分离度	0.035	$\frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	表征景观类型中草地斑块间的集散性。一般而言,指标值越大,说明草地斑块之间的相隔距离较远,分布格局较为离散;相反,草地斑块间的距离较近,呈现团聚分布的景观格局。其中, N_p 为评价单元斑块总数; A 为研究区总面积; a_{ij} 为草地斑块 ij 的面积。
	景观破碎度	0.139	A/N_p	以面积加权平均斑块大小(MPS)来表征草地景观的破碎化程度。在景观水平上,一个具有较小的 MPS 值的景观比一个具有较大 MPS 值的景观更容易破碎。A 为景观总面积; N_p 为各个类型的斑块总数。
	景观干扰度	0.054	$\sum_{t=1}^3 a_t/A$	表征居民点、仓储用地及其他特殊用地等对草地生态系统干扰破坏程度。其中, a_t 为评价单元内居民点、仓储用地及其他特殊用地的面积。
	道路切割度	0.032	$\left[1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A}\right)^2\right]$	表征道路对草地生态系统的切割程度,道路越密集,对草地生态的干扰性越强。
	景观污染度	0.256	$\sum_{j=1}^3 (a_j \cdot w_j)/A$	表征不同污染源对草地面积的污染强度,主要以采矿用地企业为污染源点,500m、1000m 和 1500m 范围进行赋值,距离越近赋值越高,分别为 0.5、0.3 和 0.2。
	景观变异系数	0.037	A_f/A_h	表征景观变化程度。其中, A_f 为评价单元内景观面积标准差; A_h 为景观面积平均值。

2.1.2 空间自相关

文中采用 Moran's I 空间自相关模型^[32]分析四子王旗各村域草地生态质量的空间聚散性。空间自相关分为全局空间自相关 I 和局部空间自相关 I_i 。其中,全局空间自相关是检验研究区内各邻近区域间是否存在空间相关性,局部空间自相关是检验观测区域与周边区域的空间关联和空间差异(公式 7 和 8)。

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_i \sum_j W_{ij}\right) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_x^2} \sum_j [W_{ij} (X_j - \bar{X})] \quad (8)$$

式中, N 为村域个数, W_{ij} 为空间权重, X_i 和 X_j 为区域 i 和区域 j 的属性, \bar{X} 为属性均值; $S_x^2 = \sum_j W_{ij} (X_j - \bar{X})^2/n$ 为方差,对于 j 的累积区域不包括区域自身 i 。通过 Geoda 软件将局部空间自相关进行可视化处理,显示不同象限的区域分布和 LISA 聚散性的显著区。

2.1.3 地理加权回归模型

(1) 地理加权回归模型(GWR 模型)。不同于最小二乘回归模型(OLS 模型),GWR 模型更适用于空间数据,能够克服变量的空间异质和空间依赖。GWR 模型不仅能够对不同区域的影响因素进行估计,还允许局部参数估计,使变量间的相互关系随空间位置的变化而变化,得到更贴近客观现实的估计结果^[33]。模型如下:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, \nu_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (9)$$

式中, Y_i 为第 i 个村域的草地生态质量; (μ_i, ν_i) 是该村域中心地理坐标; $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 为第 i 个村域的回归系数; ε_i 为随机误差项。

为避免个别村域的邻近区域样本数据稀疏而导致的估计误差,文中采用高斯核函数确定权重。

$$W_{ij} = \begin{cases} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right] & d_{ij} < b \\ 0 & d_{ij} \geq b \end{cases} \quad (10)$$

式中, d_{ij} 是回归点 i 与数据 j 的欧式距离; b 为带宽,其值大小影响 GWR 模型的空间变量。根据 Stephen 等最优带宽的确定经验, GWR 模型赤池信息 (Akaike) 最小, 带宽 b 最佳。同时, 考虑村域样本数量相对较少等情形, 文中结合 AICc 确定最终带宽。

(2) 变量选取。因变量草地生态质量主要采用综合指数法进行定量化测算; 影响草地生态质量的自变量来源于人口、经济、环境和资源等 4 个方面的压力。结合四子王旗数据获取的实际情况, 确定压力变量为: 人口压力的人口密度和劳动人口比, 经济压力的人均 GDP 和至城镇中心距离, 环境压力的生态用地比和土地城镇化率, 资源压力的人均耕地面积和草地载畜量。

表 2 变量的描述性统计分析

Table 2 Descriptive statistical analysis of variables

因素 Factor	变量名称及代码 Variable name and code	计算方法及单位 Calculation method and unit	标准差 Standard deviation	最大值 Max value	最小值 Min value	样本数 Capacity	共线性检验 Co-linearity test	
							容差 Tolerance	方差因子 VIF
人口压力 Population stress	人口密度	年末村人口数/村土地面积/ (人/km ²)	5.97	44.99	0.01	130	0.01	113.94
	劳动人口比	乡村劳动力数与乡村人口数的 比值/%	14.55	96.57	29.77	130	0.59	1.69
经济压力 Economic stress	人均 GDP	村域 GDP/人口数/(元/人)	9124.62	48939	1234	130	0.79	1.27
	至城镇中心距离	至最近城镇中心直线距离/km	43.68	193.49	1.01	130	0.21	4.69
环境压力 Environment stress	生态用地比	村域园地、林地、牧草地、水域及 未利用地面积之和/土地总 面积/%	21.79	99.91	16.53	130	0.31	3.25
	土地城镇化率	村建设用地面积/土地面积/%	13.41	100	0.88	130	0.01	119.12
资源压力 Resource stress	人均耕地面积	村内耕地面积/村人口数/ (hm ² /人)	0.71	3.84	0.30	130	0.46	2.19
	草地载畜量	年末牲畜头数/村域草地面积/ (头/km ²)	186.04	668.67	13.12	130	0.23	4.29

2.2 数据来源与处理

数据主要来源有: 研究单元是四子王旗 13 个乡镇、苏木 (含牧场) 中的 130 个行政村或嘎查; 地理空间数据来源于 2016 年四子王旗土地利用现状数据; 社会经济数据来源于 2017 年编制的《四子王旗统计年鉴》。

数据处理过程如下: (1) 结合土地利用现状图, 提取四子王旗境内所有草地斑块, 通过套合行政区界线, 筛选草地斑块面积 $\geq 400\text{m}^2$ 进行上图分析; (2) 采用 ArcGIS 10.2 软件, 对地理空间数据进行栅格化处理, 分辨率为 $30 \times 30\text{m}$, 形成可供 Fragstats 4.2 处理的 GIFF 数据, 进而运算得到草地生态质量评价的相关指标, 包括草地斑块密度、景观蔓延度、景观多样性指数、景观邻近度、景观优势度、景观分形维数、景观分离度、景观破碎度、道路切割度和景观变异系数; (3) 景观干扰度和景观污染度采用 ArcGIS 10.2 多环缓冲区和空间统计进行

提取,景观覆被指数和景观结构指数通过统计计算得到;(4)草地生态质量评价指数利用 SPSS 22.0 进行处理计算。

3 结果与分析

3.1 草地生态质量的评价结果与类型划分

文中采用极差法对数据进行标准化处理,采用熵权法计算指标权重,并运用综合指数法测算四子王旗 130 个行政村的草地生态质量,通过自然间断法对各村域草地生态质量进行划分,最终得到研究区草地生态质量评价结果和划分类型(表 3 和图 2)。

2016 年四子王旗草地生态质量的指数变化为 0.003—0.756,不同区域空间分布差异明显,北部牧区指数较高,南部农区指数较低,呈现出北高南低的空间特征。四子王旗草地生态质量的总体评价为敏感脆弱型。其中,划分类型为稳定型的村域有 5 个,面积为 2944.59 km²,占四子王旗总面积的 12.25%,主要分布在江岸苏木、闹木更苏木和红格尔苏木;划分类型为一般型的村域有 9 个,所占面积比约为 5.32%,主要分布在乌兰花镇和查干补力格苏木;划分类型为敏感型的村域有 107 个,占四子王旗村域个数的 82.3%,总面积为 19598.74 km²,主要分布在旗界边缘并向内包围其他划分类型。另外,草地生态质量为脆弱型的村域主要分散于东八号乡、库伦图镇和供济堂镇。文中,四子王旗草地生态质量最大指数值(0.756)的村域为江岸苏木的江岸嘎查,草地生态质量最小指数值(0.003)的村域位于乌兰花镇的文北路社区。

表 3 草地生态质量划分标准及类型

Table 3 Classification criteria and types of grassland ecological quality in Siziwang Banner

类型 Types	样本数 Samples	划分标准 Standard	面积 Area/km ²	比例/% Proportion	行政村名称 Name of administrative village
稳定型 stable	5	(0.346—0.756]	2944.59	12.25	江岸嘎查、阿莫吾素嘎查、瀚乌拉嘎查、夏布格嘎查和红格尔嘎查。
一般型 general	9	(0.182—0.346]	1278.87	5.32	柯梅村、栽生沟村、艾勒格嘎查、乌兰路社区、南梁路社区、文南路社区、山滩嘎查、广场路社区和白音乌拉嘎查。 卫境嘎查、公合成村、大南坡村、罗罗图村、腮忽洞村、厂汉此老村、阿力善图村、窑滩村、前古营村、巴音朱日河嘎查、东八号村、海卜子村、大青河村、白音敖包村、六股村、朝克文都村、巨龙太村、本坝村、北库伦村、闪丹村、巨巾号村、石庄子村、阿莫吾素村、三股村、体育路社区、白林地村、英土村、供济堂村、梁底村、郑家滩村、卫井路社区、太吉敖包嘎查、富强路社区、大清河村、东卜子村、乌兰淖村、中号村、毛独亥村、三合泉村、丁吉嘎查、庙后村、赛点力乌素嘎查、双井村、老圈滩村、山丹嘎查、海卜子嘎查、白彦花嘎查、拜兴图嘎查、小东营村、吉新村、韭菜沟村、温都花村、阿日点力素嘎查、六根牛村、土城子村、后卜洞村、白音希勒嘎查、活福滩村、伊克乌素嘎查、哈拉圪那村、巴音嘎查、海宽堂村、新尼淖尔嘎查、白音朝克图嘎查、哈彦忽洞村、乌兰哈达嘎查、三元井村、敖包图嘎查、吉生太村、天顺永村、席边河村、于家壕村、白音敖包嘎查、查干补力格嘎查、大新地村、高家沟村、脑木更嘎查、古营子村、白音补力格嘎查、乌布利乌斯嘎查、生盖营村、解放路社区、格日乐图雅嘎查、额尔登嘎查、西河子村、苏木加力格村、山达赖嘎查、头股村、马安桥村、库伦图村、乌兰希勒嘎查、大设进村、杨油房村、大黑河村、宝日花嘎查、和平路社区、布力格嘎查、乌拉嘎查、东玻璃村、哈沙图嘎查、乌兰牧场、富贵村、高台村、糖坊卜子村、堂村村、王府路社区和达赖嘎查。
敏感型 sensitive	107	(0.114—0.182]	19598.74	81.83	文北路社区、团结路社区、上格木村、四十顷地村、红盘村、黄羊城村、陆合堂村、麻黄洼村和非菜滩村
脆弱型 fragile	9	[0.003—0.114]	216.48	0.90	

3.2 草地生态质量空间自相关分析结果

基于 Geoda 软件,计算四子王旗村域草地生态质量的空间相关性。全局空间自相关计算结果显示:四子

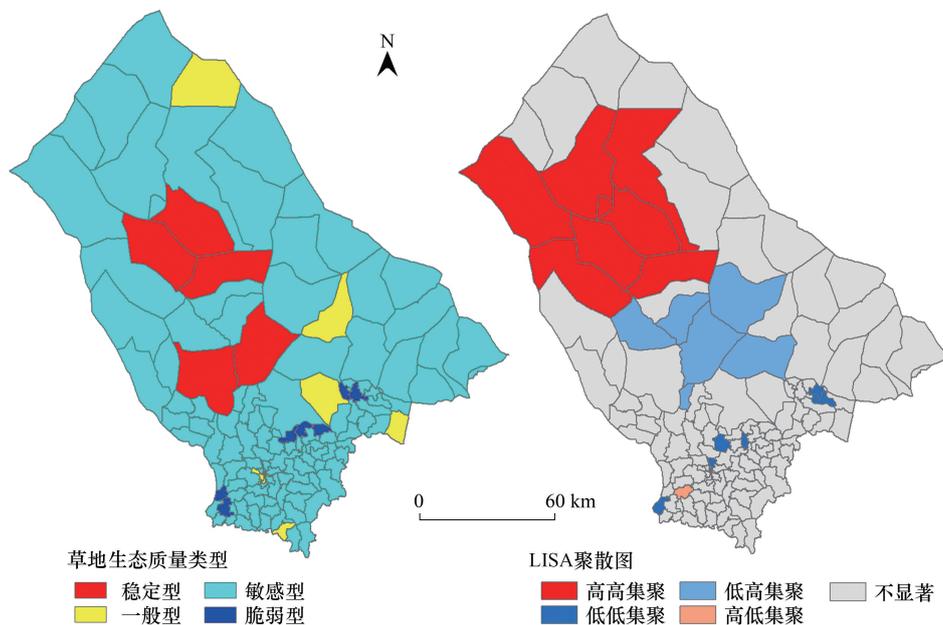


图2 四子王旗草地生态质量类型及 LISA 聚散图

Fig.2 Grassland ecological quality type and LISA cluster map in Siziwang Banner

王旗草地生态质量的全局 Moran's I 指数为 0.137, 在 5% 显著性水平下, $Z(I)$ 为 3.06, 其值高于临界值 1.96, 通过了显著性检验, 表明四子王旗草地生态质量空间格局并非呈现完全的随机分布, 而是具有一定的空间聚散特征, 即生态质量邻近的区域相对集聚。为了解四子王旗各村域间草地生态质量的空间相关, 通过绘制 LISA 显著性分布图, 进一步了解空间格局的分布差异(图 2)。四子王旗空间聚散特征呈现出明显的高高集聚、低低集聚和低高集聚。从图 3 看出, 四子王旗草地生态质量呈现出高高集聚区主要分布在北部的江岸苏木和闹木更苏木, 而低低集聚区则分散于位于东南部的东八号乡、中部的乌兰花镇和西南部的供济堂镇, 说明上述区域的草地生态质量的空间集聚效应明显, 空间分布的差异程度较小, 具有空间正相关性; 低高集聚区主要分布于红格尔苏木和查干补力格苏木, 表明该区域的草地生态质量较低, 与周边区域生态质量的空间差异显著, 存在明显的空间负相关。

3.3 OLS 与 GWR 的模型比较

为避免线性相关, 在构建回归模型前先进行指标共线性检验。当解释变量之间存在较为严重的多重共线性时, 将会造成伪回归的计量结果。为此, 本文采用容差和方差因子进行多重共线性检验, 检验标准为: 如果某一变量的容差值近似为零, 方差因子大于 10, 那么认为指标间存在多重共线性。结果显示(表 2)有人口密度和土地城镇化率的容差趋于 0, 方差因子分别为 113.94 和 119.12, 说明该类指标间存在较为严重的多重共线性。

3.3.1 OLS 模型结果分析

通过剔除引起共线性的相关变量, 以表 4 中的 6 个指标为自变量, 以草地生态质量为因变量, 创建 OLS 回归模型。结果显示仅有至城镇中心距离、生态用地比和草地载畜量 3 个变量通过了显著性检验, 明显与预期结果不符。为了消除指数趋势, 对 6 个变量进行对数化处理, 其中, 劳动人口比和生态用地比 2 个自变量采用工具变量 $\ln(LB + 1)$ 和 $\ln(UR + 1)$ 进行处理, 分析得到人均 GDP 和人均耕地面积未能通过显著性检验。综上, 基于 OLS 模型的回归估计对草地生态质量空间分布与其影响因素之间的解释性相对较差。

3.3.2 GWR 模型结果分析

为比较不同模型的估计参数, GWR 模型选用 OLS 模型筛选的相同变量进行估计。文中采用 SAM 软件, 以四子王旗各村域的重心坐标构建 GWR 模型。结果表明(表 5)影响草地生态质量的自变量均通过了显著性

检验,与草地生态质量变化呈正相关的因素依次是生态用地比、人均耕地面积和草地载畜量。其中,在其他条件不变的前提下,生态用地占区域面积比例每增加一个标准单位,草地生态质量将增加 0.142 倍;而与草地生态质量呈负相关的因素依次是至城镇中心距离、劳动人口比和人均 GDP,其中,在其他条件不变的前提下,村域中心至城镇中心的距离每增加一个标准单位,草地生态质量将下降 0.202 倍。分析发现,经济压力和环境压力对于四子王旗草地生态质量的影响明显高于人口压力和资源压力。可能的解释是草地生态质量与经济发展和环境状况更密切。四子王旗属于国家级贫困县,各乡镇、苏木经济发展不均衡,经济驱动与环境状况对村域草地生态质量空间分布的影响较大。对于草地载畜量与草地生态质量呈正相关的结论,可能的解释是生态系统的尺度敏感问题。地理学研究对象的尺度依赖同样适用于景观生态学,以往景观生态学研究多是在省域或流域等大尺度上开展的,而本文采用村域尺度更加体现了景观生态系统对尺度的敏感特征。

表 4 最小二乘回归模型的估计结果

Table 4 The estimation results of OLS model

自变量 Variable	回归系数 Regression coefficients	标准误差 Std Error	T 值 T-value	P 值 P-value
常数项 Constant	0.301 **	0.117	2.569	0.011
劳动人口比 Labor force ratio	-0.158 **	0.079	-2.011	0.047
人均 GDP Per capita gross domestic product	-0.003	0.008	-0.354	0.724
至城镇中心距离 Distance to nearest town	-0.025 ***	0.008	-3.017	0.003
生态用地比 Ecological land ratio	0.128 **	0.065	1.982	0.050
人均耕地面积 Per capita amount of farmland	0.006	0.026	0.230	0.818
草地载畜量 Grassland grazing capacity	0.033 ***	0.010	3.234	0.002

*、**和***分别表示在90%、95%和99%置信水平的显著性

表 5 地理加权回归模型的估计结果

Table 5 The estimation results of GWR model

自变量 Variable	回归系数 Regression coefficients	T 值 T-value	最小值 Minimum	下四分位值 Lwr Quartile	中位值 Median	上四分位值 Upr Quartile	最大值 Maximum
常数项 Constant	0.082	-0.092	-0.177	0.082	0.115	0.332	1265.448
劳动人口比 Labor force ratio	-0.070	-0.32	-1551.888	-0.154	-0.071	-0.056	1.517
人均 GDP Per capita gross domestic product	-0.024	-0.064	-0.134	-0.003	0.004	0.005	0.019
至城镇中心距离 Distance to nearest town	-0.202	-0.488	-0.670	-0.028	-0.012	-0.009	0.017
生态用地比 Ecological land ratio	0.142	0.338	1.372	0.110	0.134	0.163	1.927
人均耕地面积 Per capita amount of farmland	0.134	0.033	-0.300	0.000	0.013	0.016	1.631
草地载畜量 Grassland grazing capacity	0.049	0.498	68.050	0.014	0.021	0.036	0.202

3.3.3 回归模型结果比较

对比 OLS 与 GWR 模型的参数估计(表 6)。从模型精度上看,OLS 模型的 R^2_{adj} 的回归参数并不显著,仅能解释草地生态质量变异精度的 18.8%,而 GWR 模型解释的变异精度达到 49%。主要由于 OLS 模型假定是以平稳的空间变化为前提,但现实空间数据的非平稳特征,极大地降低了回归估计的解释精度。从 F 统计值上看,上述模型的 F 值所对应的概率 P 值均小于 0.01,说明 2 个模型均通过了 1%显著性水平检验,但 GWR 模型比 OLS 模型的 F 统计值更高。从赤池信息 AICc 上看,OLS 模型的 AICc 绝对值为 362.746 明显大于 GWR 模型的 AICc 绝对值 287.595,依据“GWR 模型的赤池信息绝对值最小,带宽 b 最佳”的最优带宽确定准

则^[33]并结合模拟精度的复杂性,OLS 模型明显小于 GWR 模型的模拟精度。另外,对比模型的残差平方和可知,OLS 模型较高,表明该模型的残差并非完全呈现随机分布。综上所述,地理加权回归模型相对于传统最小二乘回归模型而言,在处理非平稳性空间数据方面更具优势,能够有效解决空间数据的非平稳所导致的精度缺陷。

表 6 基于 OLS 模型与 GWR 模型的参数估计比较

Table 6 Parameter estimation comparison OLS model with GWR model

model	AICc	R	R ²	R _{adj} ²	F-value	P-value	Res.Sum.Sq.	sigma
OLS	-362.746	0.469	0.220	0.188	5.166	<.001	0.410	0.058
GWR	-287.595	0.776	0.601	0.490	5.774	<.001	0.220	0.002

3.4 基于 GWR 模型的影响因素分析

采用 ArcGIS10.2 软件,对 6 个自变量的回归系数进行空间显示(图 3),反映四子王旗草地生态质量与各影响因素之间的复杂关系。

(1)人口压力对草地生态质量的影响。劳动人口比所反映的人口问题是影响草地生态质量的一个重要方面。劳动人口比与草地生态质量呈负相关关系,意味着每增加一个标准单位的劳动人口比,草地生态质量将下降 0.070 倍。从回归系数的空间分布上看,该区呈现出由西北向东南逐渐递减的趋势,其中最大值出现在江岸苏木的达赖嘎查,最小值位于白音朝克图镇的太吉敖包嘎查。四子王旗西北地区是围垦和禁牧的重点区域,生态移民及其人口外迁所导致的劳动人口输出明显减少了人为因素对于草原环境的破坏。

(2)经济压力对草地生态质量的影响。经济压力通过经济生产能力和交通区位条件 2 个方面予以体现,以人均 GDP 和至城镇中心距离的回归系数来反映其对草地生态质量的影响。总体上,人均 GDP 与草地生态质量呈负相关关系,其负高值位于红格尔苏木—查干补力格苏木—白音朝克图镇的横向轴线上,回归系数值分布在-8.729—-5.604 之间,由于该区是农区与牧区的分界线,差异性的禁牧政策使得该区农牧经济活动较为频繁,外部性因素对草场的干扰较为明显;交通区位影响下草地生态质量呈现出条带状的分布特征,条带中心的半牧区是最强干扰区域,干扰强度由此向两边弱化。

(3)环境压力对草地生态质量的影响。环境压力对于四子王旗草地生态质量的影响主要反映在资源配置方面;生态用地比例越高,来自生态环境的压力就越低。生态用地比与草地生态质量呈正相关关系,该指标每增加 1 个标准单位,草地生态质量提升 0.142 倍,其回归系数的高值中心主要位于江岸苏木和闹木更苏木。因地处国家生态安全屏障保护区,北部天然草场受外部性干扰影响较小。京津风沙源治理工程和退耕还林还草政策的推动,致使该区生态用地比例不断提升,生态结构趋于稳定,草地生态系统的自愈能力得到了极大的提高。

(4)资源压力对草地生态质量的影响。资源压力是影响四子王旗草地生态质量空间分布的重要方面,通过人均耕地面积和草地载畜量予以体现。人均耕地面积与草地生态质量呈正相关关系,该指标每增加 1 个标准单位,草地生态质量将提高 0.049 倍,其高值中心位于江岸苏木的卫境嘎查,低值中心位于闹木更苏木的山达赖嘎查;草地载畜量与草地生态质量呈正相关关系,其高值中心位于白音朝克图镇的巴音朱日河嘎查,低值中心位于闹木更苏木的宝日花嘎查。以上地区是草原禁牧和生态移民的实施区域,当地牧民通过圈养牲畜或移民耕种,转变了传统超载过牧的生产方式,降低了资源过耗对草地生态系统传递的压力。

4 讨论

地处北方荒漠草原区的四子王旗,属我国重要的生态安全屏障区。自然因素和人为扰动致使该区草地生态系统更具脆弱性和敏感性,村域草地生态质量的空间差异更为明显。本文的改进是立足于草地生态系统的结构与功能,将相对抽象的景观变量引入草地生态质量评价中,对比 OLS 与 GWR 模型估计参数,选择较高精度的回归方法对引起草地生态质量差异性空间分布的影响因素进行分析。由于传统最小二乘回归模型仅适

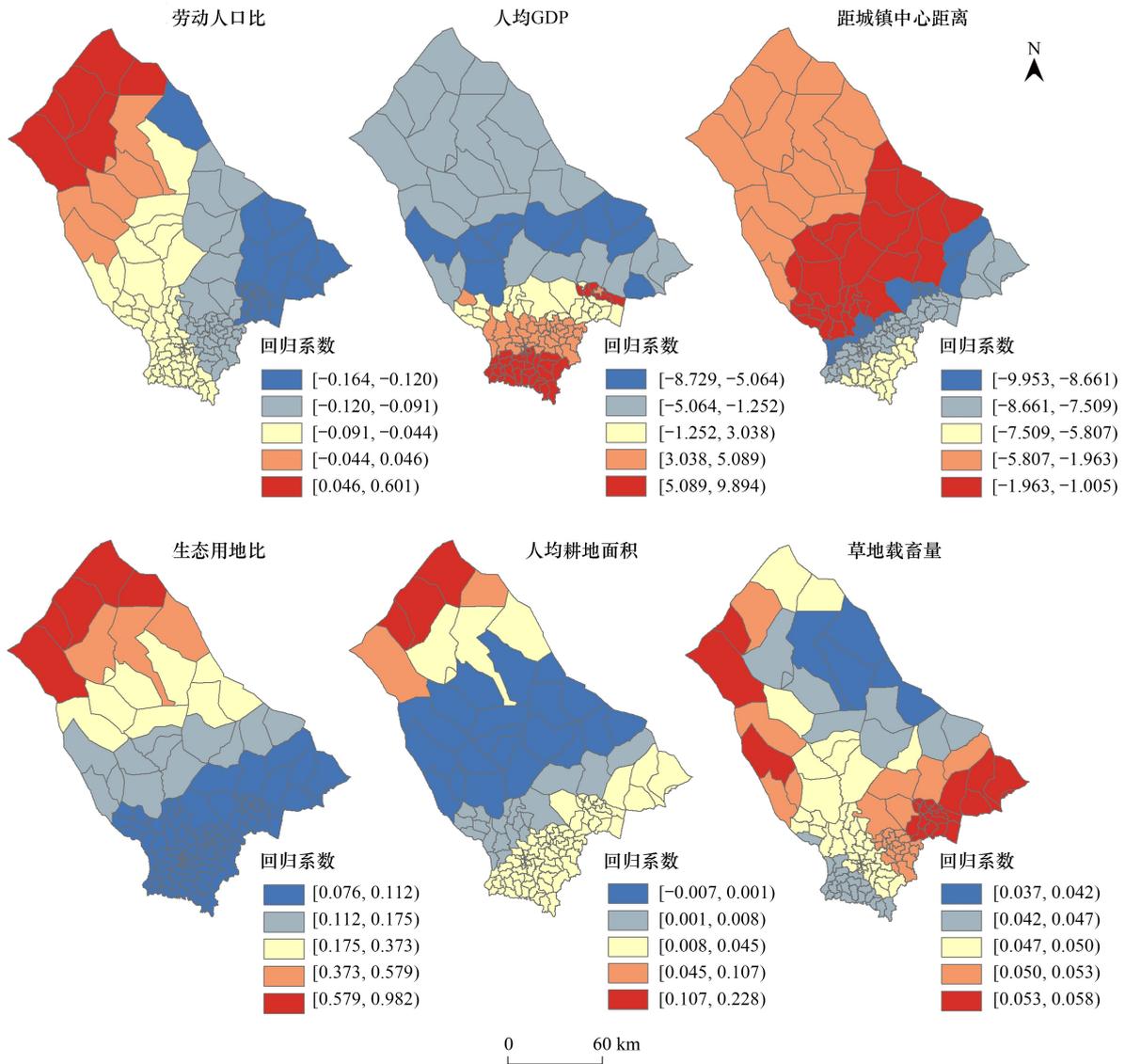


图3 基于 GWR 模型的 2016 年四子王旗草地生态质量影响因素回归系数空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the regression coefficients of driving factors of grassland ecological quality based on GWR model in Siziwang Banner

用于全局回归或平均估计,难以克服草地生态质量影响因素的异质性和不稳定特征,造成压力变量对草地生态质量解释精度的降低。文中经济压力指标的人均 GDP 和资源压力指标的人均耕地面积对草地生态质量空间分布影响不显著的结果证实了这一结论;而地理加权回归模型能够克服空间数据的非平稳特征,允许参数估计随空间位置的变化而变化,提高评价结果的估计精度,使结果分析更能符合客观实际。

除了改进方法提升精度外,还需说明的是研究视角和评价体系。从研究角度上看,不同视角的草地生态质量评价所反映的评价目标不同。其中,生产角度主要体现草地生产力的高低或草地资源的优劣,经济角度体现了草地资源的经济价值或经济水平,生态角度着重反映草地生态服务价值或景观生态功能。Dyksterhuis^[34]通过草原植被和草原基况来评价草地生产价值;任继周^[35]基于草地生产特性,从“用途—农业化—系统化”方面评价草地经济价值;谢高地等^[36]基于草地生态属性对中国自然草地生态系统的服务价值进行核算。随着生态功能与景观服务关注度的提升,瞄准景观生态视角的草地生态质量评价已逐步应用于草地修复、草原保护以及草地生态环境等方面。故本文采用景观生态视角,图谱分析草地生态质量空间差异及其

影响因素,用以反映和表达研究区草地资源的生态属性和地理特征。从评价体系上看,草地生态质量的脆弱敏感特征综合体现在草地生态系统的结构与功能等方面,所以科学、客观并针对性地构建指标评价体系是草地生态质量评价的重要环节。不同于 Borja 等^[37]为突出生态系统功能所建立的评价框架,也区别于吴海燕等^[38]所强调的生态系统结构,本研究并重草地生态系统结构与功能,从稳定性和脆弱性两个方面选取景观变量来构建指标体系,这对草地生态质量评价更具有实践意义。

5 结论

本文以内蒙古四子王旗为例,基于景观生态视角并采用景观生态质量评价理论与方法,分析荒漠草地生态质量的空间差异,通过地理加权回归模型对影响草地生态质量的非均衡因素进行回归估计,评估外源压力对草地生态质量的影响。

(1)通过对草地生态质量综合评价和类型划分得知,2016年四子王旗各村域草地生态质量综合指数的变化范围为0.003—0.765,敏感脆弱型的村域约占研究区域的82.73%,且在空间分布上存在北部高南部低的区域差异;Moran's I 指数分析可知,草地生态质量存在一定的空间自相关,局部空间相关性表现在高高集聚、低低集聚和低高集聚,反映出研究区草地生态质量空间分布的非均衡性与空间依赖。

(2)利用筛选后的6个变量与草地生态质量分别进行OLS和GWR回归估计,GWR模型在处理非平稳空间变量具有明显优势,较比以平稳性假设嵌入的全局最小二乘线性估计,克服了精度不足的缺陷。对比发现,GWR模型对草地生态质量变异解释程度为49%,明显高于OLS模型的估计精度。

(3)从GWR模型对四子王旗草地生态质量影响因素回归系数的空间分布上看,草地生态质量变化具有明显的空间差异。经济压力和环境压力对于草地生态质量的影响明显高于人口压力和资源压力;与草地生态质量变化呈正相关的因素依次是生态用地比、人均耕地面积和草地载畜量,而呈负相关的因素依次是至城镇中心距离、劳动人口比和人均GDP。

参考文献(References):

- [1] 郭建国. 景观生态学中的十大研究论题. 生态学报, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [2] 郭建国. 景观生态学:概念与理论. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42-52.
- [3] 税伟, 白剑平, 简小枚, 祁新华, 苏正安, 陈勇, 蔡应君. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能. 生态学报, 2017, 37(1): 277-285.
- [4] 侯向阳. 中国草原科学. 北京: 科技出版社, 2013.
- [5] 高艺宁, 赵萌萌, 熊梅. 典型农牧区草地景观特征及退耕潜力分析: 以内蒙古自治区武川县哈乐镇为例. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 94-103.
- [6] 徐嘉兴, 李钢, 陈国良, 赵华, 渠俊峰. 土地复垦矿区的景观生态质量变化. 农业工程学报, 2013, 29(1): 232-239.
- [7] 郑淑华, 王莹, 赵萌萌, 韩国栋, 冯雨峰. 北方农牧交错区草地生态系统服务间接价值的初步评估: 以太仆寺旗和沽源县境内为例. 草业科学, 2009, 26(9): 18-23.
- [8] 杨保军, 王成杰. 气候变化与草原生态. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2015.
- [9] 张妹婷, 翟永洪, 张志军, 唐文家, 马燕, 聂学敏, 丁玲玲. 三江源区草地生态系统质量及其动态变化. 环境科学研究, 2017, 30(1): 75-81.
- [10] 任艳敏, 唐秀美, 刘玉, 潘瑜春. 考虑耕地生态质量的基本农田划定方法. 农业工程学报, 2014, 30(24): 298-307.
- [11] 陈宁丽, 张红方, 张合兵, 司朝霞. 基于熵权TOPSIS法的耕地生态质量空间分布格局及主控因子分析: 以河南省新郑市为例. 浙江农业学报, 2015, 27(8): 1444-1450.
- [12] 左舒翟, 任引. 快速城市化地区森林景观生态质量的时空演变研究. 环境科学与技术, 2015, 39(9): 191-198.
- [13] 张燕如, 梁丽壮, 牛树奎, 韩海荣. 山西省太岳山景观生态质量评价. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 599-604.
- [14] 任金铜, 杨可明, 陈群利, 莫世江, 王志红, 冯图. 草海湿地区域景观生态脆弱性时空变化特征. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 232-239.
- [15] 孙元敏, 陈彬, 黄海萍, 马志远. 南海北部海岛周边海域生态环境质量综合评价. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2874-2880.
- [16] 陈永林, 孙永光, 谢炳庚, 康婧, 李晓青. 不同景观格局的红树林湿地生态系统质量比较研究: 以广西北部湾地区为例. 生态环境学报, 2018, 27(1): 10-15.

- 2015, 24(6): 965-971.
- [17] 孙元敏, 陈彬, 黄海萍, 马志远. 南海北部海岛周边海域生态环境质量综合评价. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2874-2880.
- [18] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 张娟, 张龙军, 罗先香. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [19] 李宇奇, 罗奕爽, 黎燕琼, 彭培好, 郑绍伟. 基于 AHP 法的乡村景观质量评价体系构建: 以川西林盘为例. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 263-268.
- [20] 杜金鸿, 张玉波, 刘方正, 陈冰, 李俊生, 王伟. 中国草地类自然保护区生态环境质量动态评价指标体系构建与案例. 草业科学, 2017, 34(11): 2378-2387.
- [21] 张秀云, 姚玉璧, 王润元, 陈昌平. 亚高山草甸类草地生态质量评价指标. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 132-136.
- [22] 蒙荣, 包晓虎, 袁清. 中国草地生态环境质量评价的基本框架. 中国草地学报, 2000, 8(1): 16-19.
- [23] 徐有绪, 宋理明, 朱宝文, 魏永林. 环青海湖地区草地生态环境质量评价方法. 青海草业, 2007, 16(4): 40-43.
- [24] 马治华, 刘桂香, 李景平, 李洁. 内蒙古荒漠草原生态环境质量评价. 中国草地学报, 2007, 29(6): 17-21.
- [25] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453.
- [26] 任国平, 刘黎明, 卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析. 农业工程学报, 2016, 32(21): 252-263.
- [27] Li C X Wu K N. Driving forces of the villages hollowing based on geographically weighted regression model: A case study of Longde County, the Ningxia Hui Autonomous Region, China. Natural Hazards, 2017, 89(3): 1059-1079.
- [28] Wang N, Mei C L, Yan X D. Local Linear Estimation of Spatially Varying Coefficient Models: An Improvement on the Geographically Weighted Regression Technique. Environment & Planning A, 2008, 40(4): 986-1005.
- [29] 董天, 肖洋, 张路, 肖焱, 郑华, 欧阳志云. 鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(2): 660-671.
- [30] 宋静, 王会肖, 王飞. 生态环境质量评价研究进展及方法评述. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 448-453.
- [31] 王宏亮, 郝晋珉, 管青春, 陈丽, 朱传民. 和林格尔县农村居民点整理潜力估算及修正系数关联分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 24-30.
- [32] 陶雨婷, 吴云清. 基于 Moran' I 指数的全国空气质量时空格局分析. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 107-113.
- [33] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M E. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [34] Dyksterhuis E J. Condition and management of range land based on quantitative ecology. Journal of Range Management, 1949, 2(3): 104-115.
- [35] 任继周. 草地农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [36] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [37] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, Demetriades N T, Ferreira J G, Forbes A T, Hutchings P, Jia X, Kenchington R, Carlos M J. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(9): 1519-1537.
- [38] 吴海燕, 吴耀建, 陈克亮, 陈朝华, 洪宜斌, 吴吉春, 陈庆辉, 张景飞. 基于“OOAO 原则”的罗源湾生态质量状况综合评价. 生态学报, 2013, 33(1): 249-259.