

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.010.

牟风云, 黄淇, 陈林. 基于优化地理探测器的生态环境质量驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 440-449.

Mu Fengyun, Huang Qi, Chen Lin. Eco-environmental Quality Driving Force Detection Using Optimized Geographic Detector[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 440-449.

# 基于优化地理探测器的生态环境质量驱动力分析

牟风云<sup>1</sup>, 黄淇<sup>1</sup>, 陈林<sup>2</sup>

(1.重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 400074; 2.重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401120)

**摘要:** [目的] 克服生态环境质量 (EQI) 演化驱动因子在离散化过程中的随机性和主观性, 优化传统地理探测器。 [方法] 利用相等间隔法、分位数法、自然断点法、几何间隔法和标准差法 5 种离散方法, 对重庆市 22 项 EQI 演化驱动因子进行离散化, 并结合地理探测器确定各因子的合理离散法与分类数, 从而探究各驱动因子的驱动力大小和各驱动因子间交互模式。 [结果] (1) 2005—2020 年重庆市 EQI 处于 I、Ⅲ和Ⅳ级的区县数量占比减少 0.211, 处于Ⅱ和Ⅴ级的区县数量占比上升 0.211, 总体呈下降趋势, 在空间上呈由西北向东南走向的梯度分布特征。 (2) 研究中各离散方法适用性排序为: 自然断点法 > 几何间隔法 > 分位数法 > 相等间隔法 > 标准差法。不同因子适用的离散方法各异, 应根据因子数据特征择优选取离散方法。 (3) 识别出影响重庆市 EQI 演化的关键驱动因子 4 个 (0.37~0.49), 主要驱动因子 13 个 (0.14~0.33)、次要驱动因子 4 个 (0.05~0.13) 和其他因子 1 个 (0.04), 各驱动因子间交互作用均为双重增强或非线性增强。 [结论] 合理的离散化可以一定程度上克服连续数据离散化过程中的随机性和主观性, 从而优化重庆市 EQI 演化驱动力探测结果。

**关键词:** 合理离散法; 地理探测器; 生态环境质量; 驱动力; 重庆市

中图分类号: S284

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0440-10

## Eco-environmental Quality Driving Force Detection Using Optimized Geographic Detector

Mu Fengyun<sup>1</sup>, Huang Qi<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>2</sup>

(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Geographic Information and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to overcome the randomness and subjectivity of ecological environment quality (EQI) evolution drivers in the discretization process, and to optimize the traditional geographic detector. [Methods] This study discretized 22 EQI evolutionary driving factors in Chongqing by using five discretization methods, namely equal interval method, quantile method, natural breakpoint method, geometric interval method and standard deviation method. Geographic detector was combined to determine the reasonable discrete method and classification number of each factor, so as to explore the driving force size of each driving factor and the interaction model of each driving factor. [Results] (1) From 2005 to 2020, the number of districts and counties in grade I, Ⅲ and Ⅳ decreased by 0.211, while the number of districts and counties in Grade Ⅱ and Ⅴ increased by 0.211, showing an overall downward trend and spatial gradient distribution from northwest to southeast. (2) The order of applicability of each discrete method in this study was: natural break point method > geometric interval method > quantile method > equal interval method > standard deviation method. The discretization methods applicable to different factors were different, so the discretization methods should be selected according to the characteristics of factor data. (3) Four key driving factors

收稿日期: 2023-01-04

修回日期: 2023-01-21

资助项目: 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助 (KF-2021-06-102); 国家重点研发计划 (2019YFB2102503)

第一作者: 牟风云 (1979—), 女, 山东高密人, 博士, 教授, 主要从事交通经济、国土资源遥感、3S 技术集成与应用。E-mail: mfynd@cqjtu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(0.37~0.49), 13 main driving factors (0.14~0.33), four minor driving factors (0.05~0.13) and one other factor (0.04) were identified, and the interaction among all driving factors was doubly enhanced or nonlinear enhanced. [Conclusion] Reasonable discretization can overcome randomness and subjectivity in the process of continuous data discretization to a certain extent, so as to optimize the detection results of EQI evolution driving forces in Chongqing.

**Keywords:** geographic detector; ecological environment quality; driving force analysis; optimal discrete method; Chongqing City

为推动生态环境质量持续改善和强化减污降碳协同增效作用,重庆市生态环境局组织编制了《重庆市生态环境监测“十四五”规划(2021—2025 年)》,并于 2022 年 1 月印发实施,将以解决生态环境领域突出问题为抓手,推进生态环境质量持续改善,筑牢长江上游重要生态屏障<sup>[1-2]</sup>。监测重庆市生态环境质量时空演化并分析其驱动力,对重庆市土地资源可持续利用和生态环境有效保护具有重要的实践意义和价值。

目前基于土地利用测度生态环境质量的方法,主要包括单一指标测度法和综合指标测度法,前者利用植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)<sup>[3]</sup>、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)<sup>[4]</sup>、植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)<sup>[5]</sup>、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)等<sup>[6]</sup>,单一指标直接表征区域生态环境质量,结果不免陷于片面;后者运用生态环境质量指数(Eco-environmental Quality Index, EQI)<sup>[7-8]</sup>、遥感生态环境指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)等<sup>[9-10]</sup>综合指标表征区域生态环境质量,相较于前者更为全面,因此应用也更为广泛;近年来,土地在“三生”(生产、生态、生活)功能间的转型与重构对于生态环境质量的影响逐渐引起关注,基于土地利用主导功能分类体系,将“三生”空间与土地利用转型相衔接,也成为探究区域生态环境质量的重要切入点<sup>[11]</sup>,因此本研究从“三生空间”与土地利用主导功能的视角出发,建立“三生”土地利用主导功能分类及其生态环境质量指数方案,据此计算重庆市各区县生态环境质量指数。

地理探测器是探究生态环境质量演化驱动力的常用方法,运用该方法前须将连续数据离散化,即在连续数据取值范围内设置若干个离散点,将取值范围划分为若干离散区间,从而将数据由定量表达转换为定性表达的过程。连续数据离散化是数据预处理的重要环节之一,因此现有研究对连续数据的离散化方法作出了丰富探讨,将现有离散化方法分类为<sup>[12]</sup>:监督和非监督离散化、动态和静态离散化、全局和局部离散化、拆分和合并离散化、直接式和增量式离散化、

单属性和多属性离散化等。亦有不少国外文献结合地理探测器探究空间数据的最优离散方法,如 Cao F 等<sup>[13]</sup>结合 5 种非监督离散化方法,详细描述了使用单因子  $q$  值和因子交互  $q$  值来确定最优离散方法的过程;Meng X 等提出了一种基于尺度的离散化方法(SBDM)<sup>[14]</sup>,即使用单因子  $q$  值的幂作为准则函数,通过缩放尺度以获取最优离散方法,又提出一种多尺度离散化方法(MSD)<sup>[15]</sup>,即通过确定一组自变量  $X$  的适当阈值,从而最小化因变量  $Y$  的方差;Song Y 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于最优参数的地理检测器(OPGD),优化了空间数据离散化过程和空间分析的空间尺度,确定了地理探测器模型的最佳参数组合。多项研究表明<sup>[13-16]</sup>,探究连续数据的合理离散方法,可以一定程度上克服连续数据离散化过程中的随机性和主观性,从而提升模型的分聚类能力、抗噪声能力以及表达能力,优化模型结果,但国内关于生态环境质量演化驱动力的研究却极少聚焦于连续驱动因子的离散化过程,因此本研究弥补这一不足,试图探讨重庆市生态环境质量演化驱动因子的合理离散方法。

本研究从“三生空间”与土地利用主导功能的视角出发计算重庆市各区县生态环境质量指数,利用相等间隔法、分位数法、自然断点法、几何间隔法、标准差法等 5 种离散方法,将连续驱动因子离散化,并代入地理探测器以最大  $q$  值确定各因子合理离散法与分类数,最后利用地理探测器的因子探测确定各因子合理离散法与分类数,探究各驱动因子的驱动力大小,并利用交互探测探究各驱动因子间交互模式。研究结果一方面可将连续数据合理离散化的思想进一步推广,引起相关研究重视,另一方面可为相关政策的贯彻落实提供科学决策依据。

## 1 研究区概况

重庆市地处我国长江上游地区腹地,近年来,作为“西部大开发”的重要战略支点、“一带一路”和长江经济带的联结点以及内陆开放高地,重庆市的土地利用在生产、生态、生活功能间大幅转型重构,对生态环境质量产生显著影响。2021 年,全市生态环

境保护投入 956.5 亿元,占 GDP 的 3.4%,同比增长 12.0%,全市环保产业实现营业收入 1 325.7 亿元,同比增长 27.7%。据生态环境部发布的《2021 中国生态环境状况公报》显示,2021 年全国生态环境质量主要指标顺利完成,生态环境质量明显改善<sup>[1]</sup>,全市生态环境状况指数为 70.2,评价结果为“良”。

## 2 研究方法

### 2.1 生态环境质量指数

本文的生态环境质量指数是研究区域内“三生”用地生态环境质量及其面积比例综合作用的结果,公

式如下:

$$EV_k=\sum_{i=1}^n(\frac{S_{ki}}{S_k}\times V_i) \tag{1}$$

式中:EV<sub>k</sub> 为第 k 个评价单元的生态环境质量指数;S<sub>ki</sub> 为第 k 个评价单元某类功能用地的面积;S<sub>k</sub> 为第 k 个评价单元的土地总面积;V<sub>i</sub> 为第 i 类功能用地的生态环境质量指数;n 为基于“三生功能”的土地资源类型数量。

### 2.2 离散方法

采用相等间隔法、分位数法、自然断点法、几何间隔法和标准差法共 5 种离散方法将连续的驱动因子离散化,各离散方法见表 1 所示。

表 1 离散方法原理  
Table 1 Introduction to discretization methods

方法名称	原理详述
相等间隔法	将数据的范围区间划分为若 n 个大小相等的子区间,需要在使用前确定子区间的数量
分位数法	每个类别都包含相等数量的要素,适用于呈线性分布的数据
自然断点法	根据数据相似性进行分类,可使各类间差异最大化,在数据差异性较大的位置确定组间断点。适用于分布不均匀且倾向于聚集的数据类型,将具有聚集特征的要素归为同一类
几何间隔法	根据具有几何系列的组距创建分类间隔,使每个类的元素数的平方和最小,确保每个类范围与每个类所拥有的值的数量大致相同,且间隔之间的变化非常一致
标准差法	标准差显示要素属性值与平均值之间的差异,利用标准差法可以显示位于平均值以上或以下的要素分类,一般以 1/4,1/2,3/4 倍标准差作为分类断点

### 2.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等<sup>[17]</sup>基于“两个关联变量的空间分布趋于一致”的理论开发而来,用于探测地理现象的空间分异性并解释其背后驱动力,包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 个探测器,本研究主要运用到因子探测和交互探测,原理如下:

(1) 因子探测。用于检验生态环境质量 Y 的空间分异性,并探测驱动因子 X<sub>n</sub> 对生态环境质量 Y 的空间分异性的解释程度,用 q 值度量,公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \tag{2}$$

式中:i=1,⋯,L 为驱动因子 X<sub>n</sub> 的分类数;N<sub>i</sub> 为第 i 类样本数;N 为总样本数;σ<sub>i</sub><sup>2</sup> 为第 i 类方差;σ<sup>2</sup> 为生态环境质量 Y 的方差。q∈[0,1],驱动因子 X<sub>n</sub> 对应的 q 值越大,表明其对生态环境质量 Y 的解释力越强。

(2) 交互探测。用于识别不同驱动因子 X<sub>n</sub> 之间的交互作用类型,判断两个驱动因子共同作用时对生态环境质量 Y 的解释力是相互增强、相互减弱还是相互独立,交互作用类型主要包括非线性增强、独立、双因子增强、单因子非线性减弱和非线性减弱。

## 3 数据获取及处理

### 3.1 数据获取

本研究涉及的数据包括重庆市 2000 年、2005 年、

2010 年、2015 年、2020 年的土地利用分布、重庆市 2016 年统计年鉴、重庆市 DEM、EDVI、GDP、人口空间分布、重庆市逐年年降水量和年平均气温空间插值数据集、全国基础地理信息数据库。数据详情如表 2 所示。

### 3.2 数据处理

(1) 生态环境指数计算。从“三生空间”与土地利用主导功能的视角出发,参考已有文献<sup>[9-10,18]</sup>建立 2005—2020 年的“三生”土地利用主导功能分类方案(表 3),从而计算重庆市各区县的 EQI,得到重庆市的 EQI 的时空分布图和等级隶属度分布,然后利用全局莫兰指数和局部莫兰指数分析重庆市 EQI 的冷热点分布特点。

(2) 驱动力因子体系构建。在借鉴已有成果的基础上<sup>[19-23]</sup>,遵循指标选取的科学性、可比性、独立性、可操作性以及可获取性等原则,从自然要素、人为要素等两个方面选取 22 个能直接或间接影响生态环境质量的因素,构建驱动因子体系,包括气温 X<sub>1</sub>、降水 X<sub>2</sub>、GDPX<sub>3</sub>、人口 X<sub>4</sub>、NDVIX<sub>5</sub>、到居民点距离 X<sub>6</sub>、到公路距离 X<sub>7</sub>、到铁路距离 X<sub>8</sub>、到河流距离 X<sub>9</sub>、到机场距离 X<sub>10</sub>、DEM X<sub>11</sub>、坡度 X<sub>12</sub>、工业生产总值 X<sub>13</sub>、第一产业生产总值 X<sub>14</sub>、第二产业生产总值 X<sub>15</sub>、第三产业生产总值 X<sub>16</sub>、农林牧渔服务业总产值 X<sub>17</sub>、城镇居民人均可支配收入 X<sub>18</sub>、公路里程 X<sub>19</sub>、工业二氧化硫排放量 X<sub>20</sub>、工业废水排放量

$X_{21}$ 、工业烟尘排放量  $X_{22}$ 。

(3) 最优离散方法确定。根据合理离散法和分类数确定流程,分别利用 5 种离散方法将 22 项连续型驱动力指标离散化为 2~20 类,并代入地理探测器计算  $q$  值,运用 MATLAB 绘制 22 个驱动力指标在不同离散方法、不同分类数下的驱动力  $q$  值曲线分布图,最后根据  $q$  值曲线分布特点、最大  $q$  值确定各驱动力指标值曲线分布类型、合理离散法与分类数,从

而对 22 项驱动力指标进行合理离散化。

(4) 因子探测及交互探测。以生态环境质量指数作为因变量  $Y$ ,以 22 项驱动力指标作为自变量  $X_n$  ( $n=1,2,\cdots,9$ ),代入 GeoDetector 的因子探测模型中,探究各驱动力指标对生态环境质量的驱动力大小,得到各驱动力指标因子探测结果;又利用地理探测器的交互探测模型,探究各驱动因子  $X$  间的交互模式,得到各驱动力指标交互探测结果。

表 2 数据详情  
Table 2 The data source

名称	格式	分辨率	来源
重庆市 2000—2015 年土地利用分布	栅格	30 m	中国科学院地理科学与资源研究所
重庆市 2020 年土地利用分布	栅格	30 m	全国地理信息资源目录服务系统
重庆市 2016 年统计年鉴	表格	—	重庆市统计局
重庆市 DEM 空间分布	栅格	30 m	
重庆市 NDVI 空间分布	栅格	1 km	
重庆市逐年年降水量、年平均气温空间插值数据集	栅格	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心
重庆市 GDP 空间分布	栅格	1 km	
重庆市人口空间分布	栅格	1 km	
全国基础地理信息数据库	矢量	1:25 万	全国地理信息资源目录服务系统

表 3 “三生”土地利用主导功能分类及其生态环境质量指数  
Table 3 The classification scheme of ‘production-living-ecological’ leading function of land use from 2005 to 2020

一级分类	二级分类	土地类型 (2005—2015 年)	生态环境 质量指数	土地类型 (2020 年)	生态环境 质量指数
生态空间	重点生态用地	有林地、灌木林地、高覆盖草地	0.7835	森林、灌木地、草地(重点生态用地 2020 年)	0.6147
	一般生态用地	疏林地、其他林地、中低覆盖草地	0.4459		
	水域生态用地	河渠、水库坑塘、滩地、滩涂	0.55	水体湿地	0.55
	生态容纳地	裸土地、裸岩石砾地	0.0312		
生产空间	城镇生产用地	其他建设用地	0.1589		
	农业生产用地	水田、旱地	0.2751	耕地	0.2751
生活空间	城乡生活用地	城镇用地、农村居民点	0.1901	人造地表	0.1901

4 结果与分析

4.1 重庆市生态环境质量指数时空演化分析

根据重庆市 EQI 时空分布(图 1),2005—2020 年 EQI 在空间上一直呈现出由西北向东南走向的梯度分布特征。根据重庆市 EQI 等级隶属度分布(图 2),重庆市 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 EQI 处于 I 级的区县占比分别为 0.132,0.132,0.132,0.079,呈先稳定后下降趋势,处于 II 级的区县占比分别为 0.289,0.211,0.184,0.368,呈先缓慢下降后迅速上升趋势,处于 III 级的区县占比分别为 0.158,0.105,0.132,0.132,呈先下降后稳定趋势,处于 IV 级的区县占比分别为 0.158,0.263,0.237,0.026,呈先上升后下降趋势,处于 V 级的区县占比分别为:0.263,0.289,0.315,0.395,呈加速上升趋势,由此可知,处于 I、III

和 IV 级的区县减少,处于 II 和 V 级的区县增多,结合图 1 和图 2 发现,许多区县 EQI 由 I 级转为 II 级,由 IV 级转为 V 级,从这个角度看,重庆市生态环境质量呈下降趋势。

4.2 重庆市生态环境质量驱动因子合理离散法与分类数确定结果

观察各驱动因子  $q$  值曲线分布图(图 3),发现 22 个因子的  $q$  值总体上均随分类数增加而逐渐上升,但有些为单调上升,有些为波动上升;按曲线分布特点将 22 个因子分为 3 种类型:紧凑型(8 个)、波动型(3 个)、差异型(11 个),随分类数增加,紧凑型  $q$  值曲线逐渐趋于稳定,彼此间差异较小;波动型  $q$  值曲线内部波动起伏剧烈,彼此间差异不大;差异型部分  $q$  值曲线内部波动起伏强烈,彼此间差异显著;根据图 3 中的最大  $q$  值确定各驱动因子的合理离散法与分



类数(表 4),分位数法 6 个、几何间隔法 7 个、相等间隔法 2 个、自然断点法 7 个,由此可知,研究中各离散

方法适用性排序为:自然断点法>几何间隔法>分位数法>相等间隔法>标准差法。

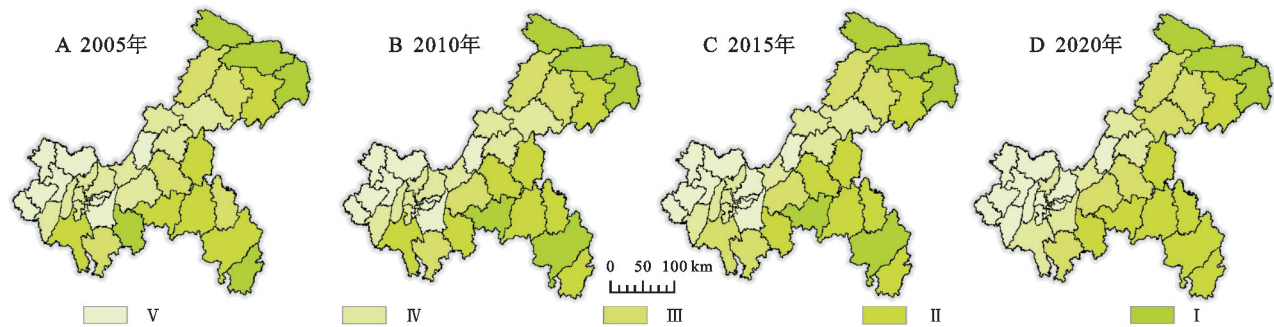


图 1 重庆市生态环境质量指数时空分布

Fig. 1 Temporal and spatial distribution of EQI in Chongqing

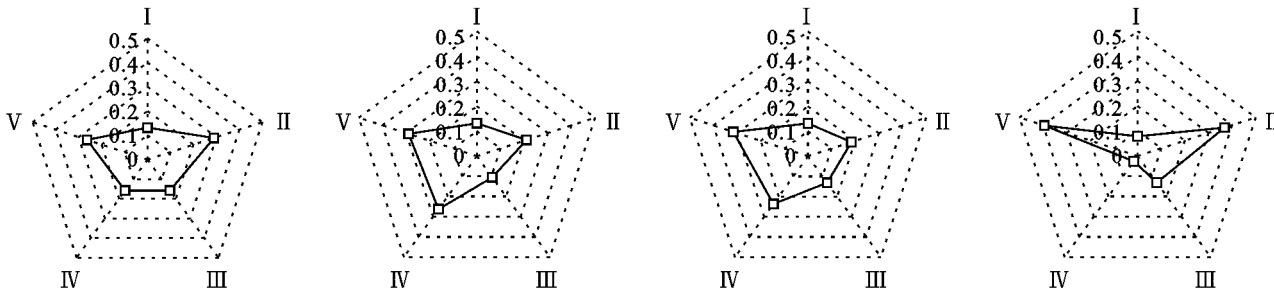


图 2 重庆市生态环境质量指数等级隶属度分布

Fig. 2 Distribution of rank membership of EQI in Chongqing

4.3 重庆市生态环境质量演化驱动因子及其交互作用分析

根据驱动因子探测结果(图 4),按驱动力  $q$  值大小将驱动因子依次划分为 4 个梯度:驱动因子(5 个)、主要驱动因子(13 个)、次要驱动因子(5 个)和其他因子(4 个)。关键驱动因子是决定重庆市生态环境质量演化的关键因素,均为自然因素,包括 DEMX<sub>11</sub>(0.49)、气温 X<sub>1</sub>(0.46)和坡度 X<sub>12</sub>(0.39);主要驱动因子是驱动重庆市生态环境质量演化的主要因素,多属于经济因素,包括人口 X<sub>4</sub>(0.37)、GDPX<sub>3</sub>(0.33)、NDVIX<sub>5</sub>(0.32)、第二产业生产总值 X<sub>15</sub>(0.30)、第一产业生产总值 X<sub>14</sub>(0.30)、工业生产总值 X<sub>13</sub>(0.29)、第三产业生产总值 X<sub>16</sub>(0.29)、农林牧渔服务业总产值 X<sub>17</sub>(0.28)、城镇居民人均可支配收入 X<sub>18</sub>(0.27)和公路里程 X<sub>19</sub>(0.26);次要驱动因子是驱动重庆市生态环境质量演化的次要因素,主要为工业三废,包括工业废水排放量 X<sub>21</sub>(0.26)、工业二氧化硫排放量 X<sub>20</sub>(0.23)、工业烟尘排放量 X<sub>22</sub>(0.20);其他因子对重庆市生态环境质量演化的影响较小,包括到铁路距离 X<sub>8</sub>(0.14)、到机场距离 X<sub>10</sub>(0.13)、到公路距离 X<sub>7</sub>(0.08)、到居民点距离 X<sub>6</sub>(0.06)、降水 X<sub>2</sub>(0.05)和到河流距离 X<sub>9</sub>(0.04)。

根据驱动因子交互探测结果(表 5),总体上看,驱动因子交互作用强度排序为:DEMX<sub>11</sub>(0.49~0.59)>气温 X<sub>1</sub>(0.46~0.53)>坡度 X<sub>12</sub>(0.39~0.53)>人口 X<sub>4</sub>

(0.37~0.57)>GDPX<sub>3</sub>(0.33~0.57)>NDVIX<sub>5</sub>(0.32~0.52)>第二产业生产总值 X<sub>15</sub>(0.30~0.58)>第一产业生产总值 X<sub>14</sub>(0.30~0.57)>工业生产总值 X<sub>13</sub>(0.29~0.56)>第三产业生产总值 X<sub>16</sub>(0.29~0.57)>农林牧渔服务业总产值 X<sub>17</sub>(0.28~0.55)>城镇居民人均可支配收入 X<sub>18</sub>(0.27~0.59)>公路里程 X<sub>19</sub>(0.26~0.58)>工业废水排放量 X<sub>21</sub>(0.26~0.57)>工业二氧化硫排放量 X<sub>20</sub>(0.23~0.59)>工业烟尘排放量 X<sub>22</sub>(0.20~0.57)>到铁路距离 X<sub>8</sub>(0.14~0.52)>到机场距离 X<sub>10</sub>(0.13~0.53)>到公路距离 X<sub>7</sub>(0.08~0.51)>到居民点距离 X<sub>6</sub>(0.06~0.52)>降水 X<sub>2</sub>(0.05~0.54)>到河流距离 X<sub>9</sub>(0.04~0.50)。

5 结论

(1) 由于重庆市集大城市、大农村、大山区、大库区于一体,各区域自然条件和资源禀赋差异较大、发展不平衡不充分,以往渝东北、渝东南曾分别被划分为生态涵养发展区和生态保护发展区,现在渝东北三峡库区城镇群探索生态优先新路子,渝东南武陵山区城镇群打造文旅融合发展新标杆,因而渝东北、渝东南地区生态环境质量相对于主城都市区而言一直保持显著优势,重庆市 EQI 在空间上亦呈由西北向东南走向的梯度分布特征。而近年来重庆市的土地利用在生产、生态、生活功能间大幅转型重构,对生态环境质量产生显著影响,

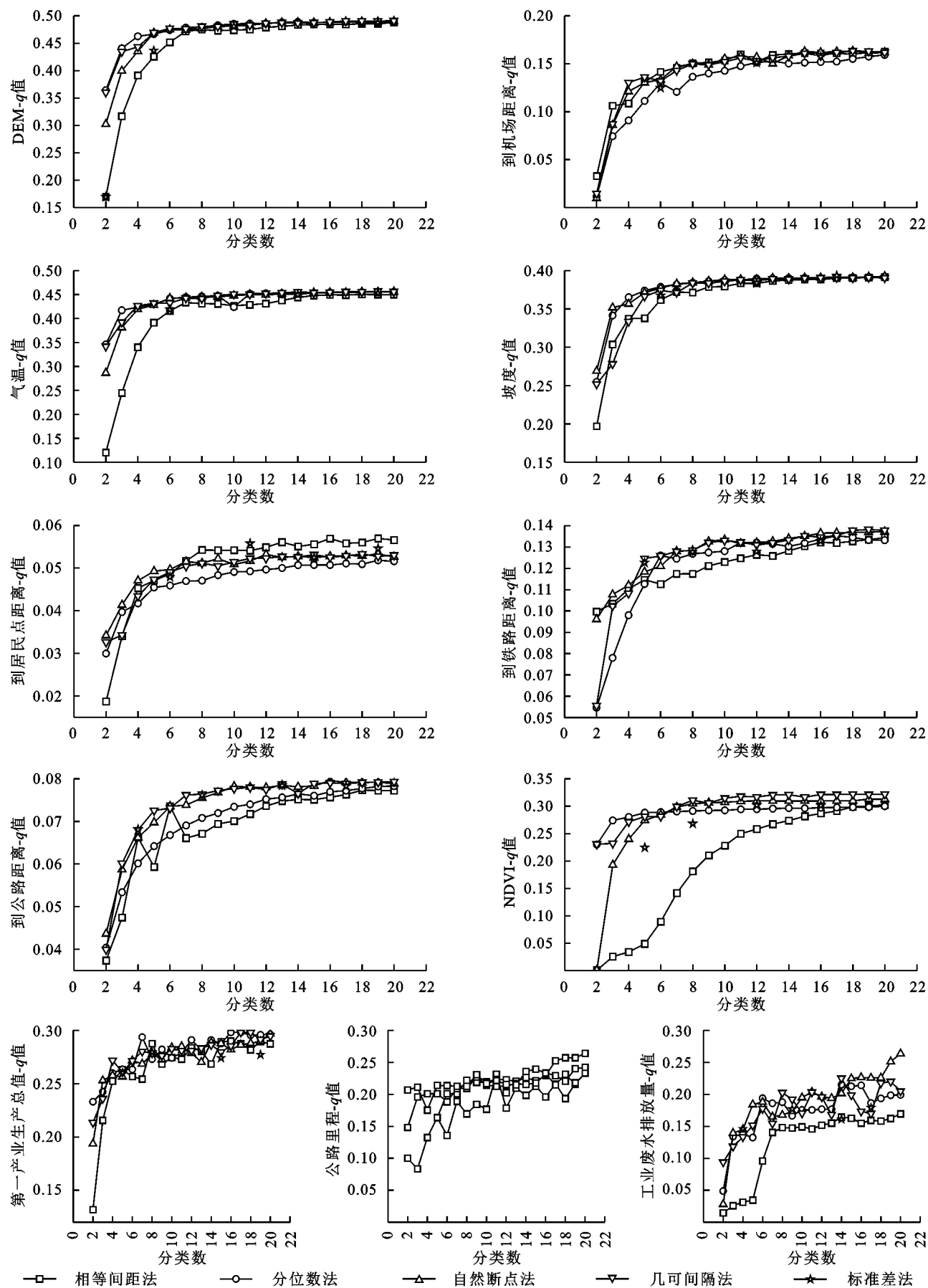


图 3 各驱动因子  $q$  值曲线分布

Fig. 3 Distribution of  $q$  values of each driving factor

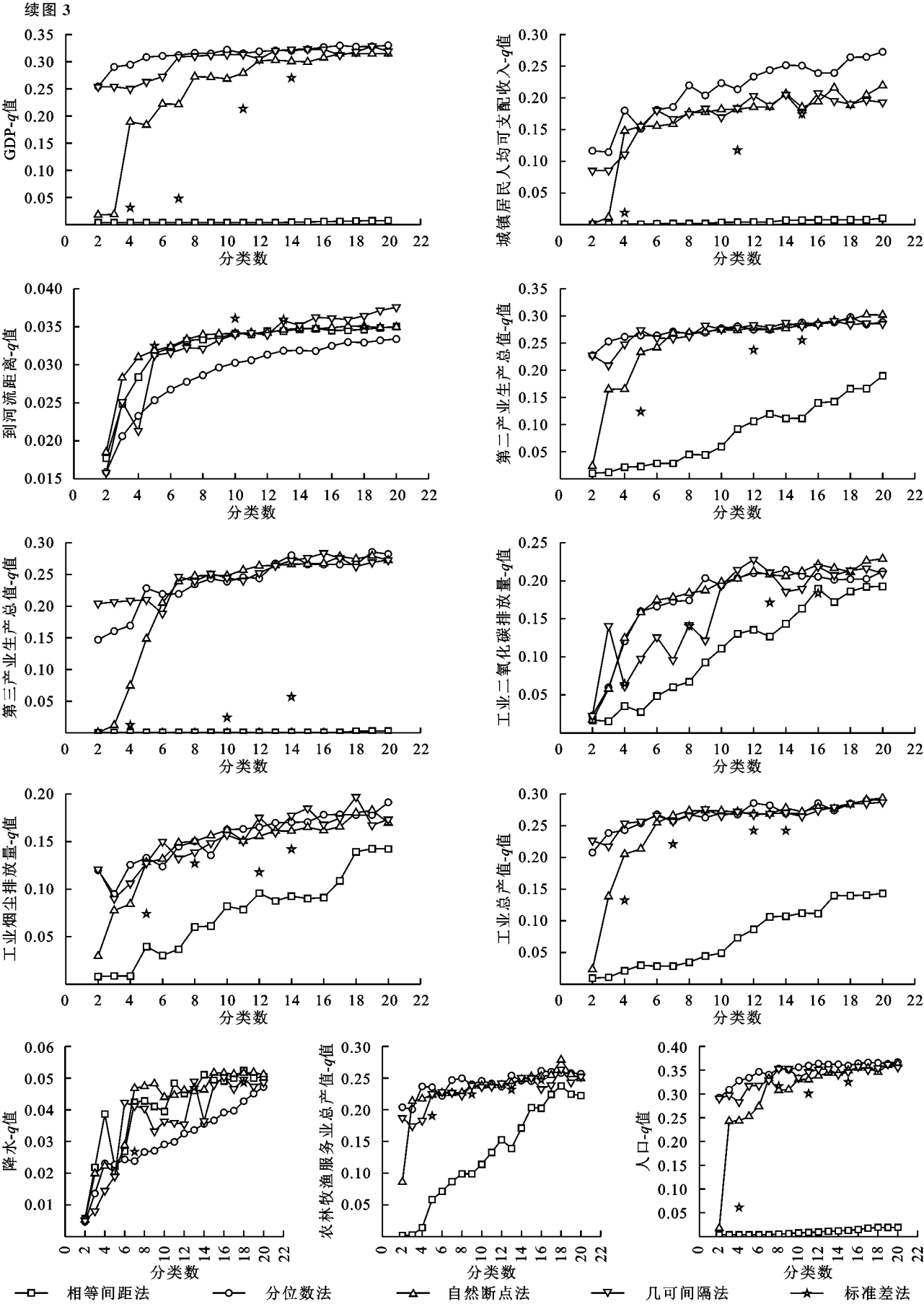


图 3 各驱动因子  $q$  值曲线分布

Fig. 3 Distribution of  $q$  values of each driving factor

表 4 各驱动因子的合理离散法和分类数		
Table 4 Optimal combinations of discretization method and class number for driving factors		
因子	合理离散法	合理分类数
城镇居民人均可支配收入 $X_{18}$	分位数法	20
第三产业生产总值 $X_{16}$		19
第一产业生产总值 $X_{14}$		17
公路里程 $X_{19}$		20
GDP $X_3$		20
人口 $X_4$		20
DEM $X_{11}$		20
气温 $X_1$		19
到河流距离 $X_9$		20
到机场距离 $X_{10}$	几何间隔法	18
到铁路距离 $X_8$		19
工业烟尘排放量 $X_{22}$		18
NDVI $X_5$		20
降水 $X_2$	相等间隔法	18
到居民点距离 $X_6$		19
第二产业生产总值 $X_{15}$		19
工业二氧化硫排放量 $X_{20}$		20
工业生产总产值 $X_{13}$	自然断点法	20
农林牧渔服务业总产值 $X_{17}$		18
坡度 $X_{12}$		20
到公路距离 $X_7$		16
工业废水排放量 $X_{21}$		20

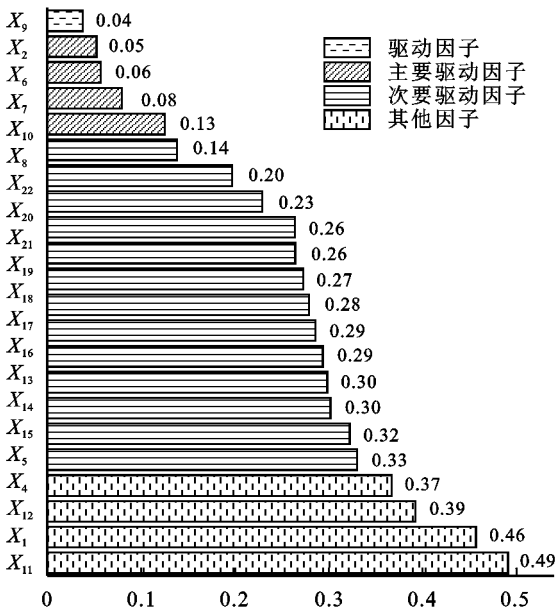


图 4 各驱动因子的因子探测结果

Fig. 4 Factor detection result

(2) 根据驱动因子交互探测结果,分析驱动力  $q$  值曲线分布,发现 22 个因子的  $q$  值总体上均随分类数增加而逐渐上升,分为紧凑型 8 个、波动型 3 个和差异型 11 个,并确定了各因子的合理离散法和分类数,其中分位数法 6 个,几何间隔法 7 个、相等间隔法 2 个、自然断点法 7 个。由此可知,研究中各离散方法适用性排序为:自然断点法>几何间隔法>分位数法>相等间隔法>标准差法。不同因子适用的离散方法各异,研究时应根据因子数据特征择优选取离散方法。

表 5 各驱动因子的交互探测结果																						
Table 5 Interaction detection result																						
因子	$X_{11}$	$X_1$	$X_{12}$	$X_4$	$X_3$	$X_5$	$X_{15}$	$X_{14}$	$X_{13}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$	$X_{19}$	$X_{21}$	$X_{20}$	$X_{22}$	$X_8$	$X_{10}$	$X_7$	$X_6$	$X_2$	$X_9$
$X_{11}$	0.49																					
$X_1$	0.51	0.46																				
$X_{12}$	0.53	0.53	0.39																			
$X_4$	0.57	0.52	0.51	0.37																		
$X_3$	0.57	0.52	0.50	0.45	0.33																	
$X_5$	0.52	0.49	0.48	0.48	0.46	0.32																
$X_{15}$	0.58	0.52	0.49	0.48	0.43	0.46	0.30															
$X_{14}$	0.57	0.52	0.48	0.48	0.45	0.45	0.35	0.30														
$X_{13}$	0.56	0.51	0.48	0.48	0.46	0.45	0.32	0.35	0.29													
$X_{16}$	0.57	0.52	0.49	0.47	0.43	0.45	0.34	0.33	0.34	0.29												
$X_{17}$	0.55	0.50	0.48	0.48	0.46	0.44	0.35	0.34	0.35	0.34	0.28											
$X_{18}$	0.59	0.53	0.51	0.48	0.47	0.46	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.27										
$X_{19}$	0.58	0.52	0.49	0.49	0.47	0.45	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.26									
$X_{21}$	0.57	0.52	0.48	0.48	0.44	0.44	0.36	0.35	0.36	0.34	0.35	0.35	0.36	0.26								
$X_{20}$	0.59	0.53	0.49	0.49	0.47	0.45	0.36	0.35	0.36	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35	0.23							
$X_{22}$	0.57	0.52	0.48	0.46	0.46	0.42	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.32	0.20						
$X_8$	0.52	0.49	0.43	0.43	0.40	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.37	0.37	0.35	0.33	0.32	0.14					
$X_{10}$	0.53	0.49	0.46	0.46	0.43	0.39	0.39	0.40	0.39	0.37	0.38	0.40	0.38	0.36	0.37	0.33	0.22	0.13				
$X_7$	0.51	0.47	0.42	0.40	0.36	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33	0.32	0.31	0.28	0.25	0.18	0.19	0.08			
$X_6$	0.52	0.48	0.44	0.42	0.40	0.35	0.38	0.38	0.36	0.36	0.34	0.33	0.33	0.34	0.30	0.27	0.21	0.19	0.13	0.06		
$X_2$	0.54	0.50	0.46	0.45	0.44	0.37	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.37	0.35	0.37	0.34	0.32	0.23	0.24	0.16	0.13	0.05	
$X_9$	0.50	0.47	0.44	0.39	0.36	0.34	0.33	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.26	0.23	0.19	0.17	0.12	0.09	0.09	0.04



(3) 研究识别出影响重庆市 EQI 演化的关键驱动因子4个(0.37~0.49)、主要驱动因子13个(0.14~0.33)、次要驱动因子4个(0.05~0.13)和其他因子1个(0.04)。关键驱动因子均为自然因素,受特殊地形、地貌以及气候影响,重庆市中心城区一直呈现出“多中心、组团式”山水城市空间格局,各大组团间的隔离带可以防止组团蔓延发展,具备优化城市空间结构、维护城市生态安全的功能;主要驱动因子多属于经济因素,近年来,重庆市作为“一带一路”和“长江经济带”的联结点,各区县经济形势向好,三大产业、农林牧渔业的粗放发展,导致城市建设用地无序蔓延,各大组团隔离带内绿地被不断蚕食,其生态调节功能也被不同程度削弱,部分组团发生粘连发展,“多中心、组团式”空间格局日益弱化;次要驱动因子主要为工业三废,相较于工业二氧化硫排放量、工业烟尘排放量,重庆市的工业废水排放量最少,但对生态环境质量的影响却最大,可能是由于重庆市水系密布,工业废水排放后经由水系更易造成生态环境大面积污染。

(4) 驱动因子间的交互作用强度均大于两因子驱动力,且随两因子驱动力降低而降低,呈现出梯度降低趋势,同时任意两项驱动因子间的交互作用均为双重增强或非线性增强。由此可推知,生态环境质量不只受各驱动因子独立作用影响,更受众多因子间的密切交互作用影响,部分驱动因子对生态环境质量的直接驱动力虽小,但却可通过影响其他驱动因子而间接影响生态环境质量,足见交互探测不可忽视。

连续数据离散化是数据预处理的重要环节之一,合理的离散化可以一定程度上克服连续数据离散化过程中的随机性和主观性,从而提升模型的分聚类能力、抗噪声能力以及表达能力,优化模型运算结果,但国内关于生态环境质量演化驱动力的研究却极少聚焦于连续驱动因子的离散化过程,因此本研究弥补这一不足,结合地理探测器和相等间隔法、分位数法、自然断点法、几何间隔法、标准差法等5种离散方法,在确定生态环境质量驱动因子的合理离散法上做出了有益尝试,但研究亦存在局限之处,即仅在5种离散方法中择优选取了最优离散方法,未将其他更多离散方法纳入比较,在后续的研究中将进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 刘毅,寇江泽.二〇二一年全国生态环境质量明显改善[N].人民日报,2022-05-31(014).  
Liu Y, Kou J Z. China's ecological and environmental quality improved significantly in 2001 [N]. People's Daily, 2022-05-31(014).
- [2] 陈维灯.重庆生态环境质量持续改善[N].重庆日报,2022-06-03(2).  
Chen W D. Sustainable improvement of ecological environment quality in Chongqing [N]. Chongqing Daily, 2022-06-03(2).
- [3] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析[J].水土保持研究,2022,29(4):336-343.  
Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, et al. Analysis of vegetation change and natural driving factors in Sanjiang source based on geographic detector[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):336-343.
- [4] Li Y, Cao Z, Long H, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,142:697-715.
- [5] 王森,刘珮玥,刘博文,等.区域植被净生产力模型的生态红线实施评估[J].测绘科学,2022,47(2):157-165.  
Wang M, Liu P Y, Liu B W, et al. Evaluation of ecological red line for regional net vegetation productivity model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022,47(2):157-165.
- [6] 尚雪,何钊全,张铜会.增强型植被指数时空变化特征及其驱动机理[J].森林与环境学报,2020,40(5):478-485.  
Shang Xue, He Z Q, Zhang T H. Spatial and temporal variation of enhanced vegetation index and its driving mechanism[J]. Journal of Forests and Environment, 2020,40(5):478-485.
- [7] Song R, Wang H, Di Zhang Z L, et al. Conservation outcomes assessment of Sanjiangyuan alpine grassland with MODIS-EVI approach [J]. Biodiversity Science, 2018,26(2):149-157.
- [8] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(1):97-106.  
Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation and ecological environment effect based on “three-growth space”: A case study of the core area of the Yangtze River Delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(1):97-106.
- [9] 高星,刘泽伟,李晨曦,等.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J].生态学报,2020,40(20):7113-7122.  
Gao X, Liu Z W, Li C X, et al. Study on land use function transformation and ecological environment effect in

- Xiongan New Area based on “Three-life space”[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,40(20):7113-7122.
- [10] 董建红,张志斌,笄晓军,等.“三生”空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力:以甘肃省为例[J]. *生态学报*,2021,41(15):5919-5928.
- Dong J H, Zhang Z B, Da X J, et al. Ecological and environmental effects and driving forces of land use transition from the perspective of “three-life” space: A case study of Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,41(15):5919-5928.
- [11] 王建,赵牡丹,李健波,等.基于 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J].*山地学报*,2021,39(6):830-841.
- Wang J, Zhao M D, Li J B, et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of ecological and environmental quality in Qinba Mountain region based on MODIS time series data[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021,39(6):830-841.
- [12] 李家旭.地理探测器中数据空间离散化算法设计实现与应用[D].南宁:南宁师范大学,2020.
- Li J X. Design, implementation and application of data space discretization algorithm in geodetector [D]. Nanning: Nanning Normal University, 2020.
- [13] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2013,50(1):78-92.
- [14] Meng X, Gao X, Li S, et al. SBDM v1.0: A scaling-based discretization method for the Geographical Detector Model[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2018;1-25.
- [15] Meng X, Gao X, Lei J, et al. Development of a multi-scale discretization method for the geographical detector model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021,35(8):1650-1675.
- [16] Song Y, Wang J, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2020,57(5):593-610.
- [17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospect [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.(in Chinese).
- [18] 黄天能,张云兰.基于“三生空间”的土地利用功能演变及生态环境响应:以桂西资源富集区为例[J].*生态学报*,2021,41(1):348-359.
- Huang T N, Zhang Y L. Evolution of land use function and ecological environment response based on “three-life space”: A case study of resource-rich areas in western Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,41(1):348-359.
- [19] 章程焱,杨少康,董晓华,等.基于 RSEI 指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究[J].*水土保持研究*,2023,30(1):356-363.
- Zhang C Y, Yang S K, Dong X H, et al. Temporal and spatial evolution of ecological environment quality and its influencing factors in the Upper reaches of the Yangtze River Basin based on RSEI index[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,30(1):356-363.
- [20] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].*地理研究*,2019,38(9):2173-2187.
- Chen W X, Li J F, Zeng J, et al. Spatial differentiation and formation mechanism of eco-environmental effects of land use change in China [J]. *Geographical Research*, 2019,38(9):2173-2187.
- [21] 安敏,李文佳,吴海林,等.三峡库区生态环境质量的时空格局演变及影响因素[J].*长江流域资源与环境*, 2022,31(12):2743-2755.
- An M, Li W J, Wu H L, et al. Spatial and temporal pattern evolution and influencing factors of eco-environmental quality in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022,31(12):2743-2755.
- [22] Wu X, Zhang H. Evaluation of ecological environmental quality and factor explanatory power analysis in western Chongqing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021,132:108311.
- [23] Ji J, Wang S, Zhou Y, et al. Studying the eco-environmental quality variations of Jing-Jin-Ji urban agglomeration and its driving factors in different ecosystem service regions from 2001 to 2015 [J]. *Ieee Access*, 2020,8:154940-154952.