

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220301.001.

朱纹君, 韩美, 魏丹妮, 等. 黄河三角洲人地关系协调度时空演变及其驱动机制[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 388-396.

ZHU Wenjun, HAN Mei, WEI Danni, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Human-Environment Coordination in the Yellow River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 388-396.

黄河三角洲人地关系协调度时空演变及其驱动机制

朱纹君, 韩美, 魏丹妮, ALI Muhammad, 王佳炜, 孙金欣

(山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250014)

摘 要:黄河三角洲是黄河流域典型的生态环境脆弱区,在黄河流域生态保护与高质量发展的要求下,定量评价区域人地关系对黄河三角洲生态环境修复与经济发展有重要意义。基于1998—2018年遥感影像数据,运用耦合协调度模型、地理探测器等方法,分析了20年间黄河三角洲人地协调度时空演变特征,探讨了人地协调度空间演变特征及其驱动机制。结果表明:(1)1998—2018年黄河三角洲人地协调度大致呈由内陆向沿海逐渐递减的空间分布特征,人地关系失调区域面积不断下降,协调区域面积不断上升,人地关系逐步缓和。主要协调水平为良好协调,区域面积达2 847.57 km²;各乡镇人地协调度等级呈自黄河流域向两岸地区递减的特征,各乡镇协调水平不断上升且差异显著但逐步缩小,极差值缩减至0.24,六合镇、胜坳镇、垦利街道和永安镇协调水平增长最为显著,分别上升了0.27、0.26、0.25、0.24;(2)因子探测器结果表明人均水资源、年均降水量、植被覆盖率与人口数量对人地协调度的解释力较高,经济发展水平、自然资源禀赋与自然环境特征在人地协调演进过程中的重要程度逐步上升;(3)研究时段内各因子间交互作用对人地协调度的贡献度不断增加,主要交互作用方式为非线性增强,人均水资源、人均建设用地面积、DEM与其他部分因子间交互作用方式逐步转变为双因子增强。

关键词:人地协调度;驱动机制;人类活动;空间分布;黄河三角洲

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0388-09

Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Human-Environment Coordination in the Yellow River Delta

ZHU Wenjun¹, HAN Mei², WEI Danni³, ALI Muhammad⁴, WANG Jiawei⁵, SUN Jinxin⁶

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: The Yellow River Delta is a typical ecological environmental fragile area of the Yellow River Basin. Under the requirements of ecological protection and high-quality development strategy, quantitatively evaluating human-environmental relationship is of great significance for ecological environment repairment and economic development of the Yellow River Delta. Based on the remote sensing images of the Yellow River Delta from 1998—2018 and coordination model and Geo-detector, the temporal and spatial evolution of human-environment coordination in the Yellow River Delta in the past 20 years was analyzed, and the driving mechanism of human-environment coordination was explored. The results showed that: (1) from 1998—2018, the distribution pattern of human-environment coordination in the Yellow River Delta showed high level inland and low level in the coastal; the uncoordinated area was constantly decreasing and the coordinated area was still rising; the relationship between human and environment was eased; the main characteristic of human-environmental relationship was good coordination, and area was 2 847.57 km²; spatial distribution pattern in different counties showed difference and the coordination level was rising in regional and county scale; the extreme difference of different counties was decreasing to 0.24; coordinated level of Liuhe Town, Shengtuo Town, Kenli Street and Yongan Town were increasing significantly, and rose by 0.27, 0.26, 0.25,

收稿日期:2021-12-02

修回日期:2021-12-29

资助项目:山东省社科规划重大委托项目“黄河三角洲生态保护与高质量发展研究”专题;国家自然科学基金面上项目(41371517);山东省社科规划重点项目(18BJJJ05)

第一作者:朱纹君(1997—),男,吉林敦化人,硕士研究生,研究方向:自然地理学。E-mail:zwj945945@163.com

通信作者:韩美(1963—),女,山东潍坊人,教授,主要从事环境变化与区域响应研究。E-mail:hanmei568568@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

0.24, respectively; (2) the results of driving factors indicated that the average water resource, average annual precipitation, vegetation coverage and population had high interpretation; importance of economic development level, natural resources and natural environment characteristics in the evolution of human-environment coordination increased; (3) during the study period, the contribution of interactions of each factor to human-environment coordination had been increasing; the interactions of per capita water resources, per capita construction land area and DEM with other partial factors gradually changed into enhancement effect.

Keywords: human-environment coordination; driving mechanism; human activity; spatial distribution; Yellow River Delta

人地关系指人类活动与自然环境之间的关系^[1],是地域系统的核心理论。其核心目标是协调区域社会经济发展与自然环境间的矛盾,达到人与自然环境协调发展^[2]。工业革命以来,随着社会经济与科学技术的高速发展,人类活动对自然环境的影响不断加深^[3]。自然资源稀缺、生态环境质量下降、地表圈层功能退化等^[4-5]生态环境问题日益严峻,人地关系日渐紧张^[6]。中国是世界上最大的发展中国家,也是经济发展速度最快的国家之一。党的“十八大”报告明确指出生态文明建设与环境问题是我国经济社会可持续发展的焦点问题^[7]。在过去的三十年里,我国经济的高速发展使得自然环境系统的脆弱性增加,对生态环境造成了极大的破坏,阻碍可持续发展进程^[8]。因此,为使自然资源满足人类经济社会发展的同时保证生态环境安全,就必须实现可持续发展,实现可持续发展的前提就是要实现人地协调^[9]。

人地协调是经过漫长历史时期演变得出的人地关系理论。不同时期由于生产力水平的不同,人与自然环境关系的内涵不同。实质上,人地关系包含人的主观能动性和自然环境的制约性,人地关系理论的差异性表现在对人或自然的主体地位强调不同。早期人地关系的研究对自然环境地位强调性较高,认为人地关系的演进主要受自然力量的驱动^[10]。因此,大多学者通过环境因素的变化反映人地关系^[11]。工业革命以来,社会生产力得到极大发展,人地关系的研究开始倾向于人的主体地位。从人类活动角度出发构建经济指标体系,评估区域人地关系逐渐成为主流思想^[12-13]。该时期社会经济的高速发展使生态环境遭到严重的破坏,20 世纪 60 年代后,国际社会开始不断反思与探寻经济社会与自然环境协调发展的途径,以期保证资源环境在满足社会经济发展的同时,保护生态环境质量不被破坏^[14-15]。自此,可持续发展正式提出,人地协调发展得到高度重视。新时期人地关系的研究将自然环境与人视为同等地位,要求人与自然协调发展^[16-17]。在现代入地协调观的要求下,人地关系的评估需综合考量人对自然环境的影响和自

然环境对人的制约性。基于此,国内外学者通过构建双向指标体系,借助 DFSR^[18](驱动力—状态—响应)、VSD^[19](暴露—敏感—适应)、SD^[20](人地系统动力学)、PRED^[21](人口、资源、环境、发展)和 EF^[22](生态足迹)等模型量化人地关系,旨在探求区域人地关系的协调程度,调节人地矛盾。

黄河三角洲是黄河下游典型的生态环境脆弱区。近年来,受区域内人类活动显著影响,人地关系日趋紧张^[23]。在黄河流域生态保护和高质量发展的战略指导下,探究人地关系协调度的时空演变及其驱动机制,对黄河三角洲实现生态保护和高质量发展有重要意义。因此,本文依据新时期人地关系的内涵并结合相关研究^[24],运用人类活动强度^[25]与生态承载力^[26]构建人地协调度计算模型,测算黄河三角洲人地协调度时空演变特征,同时应用地理探测器对其驱动机制进行分析,以期对黄河三角洲高质量发展与可持续发展提供参考。

1 研究区概况

黄河三角洲(东经 118°07′—119°18′,北纬 37°09′—38°12′)地处海陆生态环境过渡带,以其丰富的资源和生态环境的脆弱性而著名。主体位于黄河入海口处,以宁海为顶点,南抵支脉河河口,西起套儿河口,地处渤海湾与莱州湾之间,地势西南高东北低,地形起伏度较小,总面积达 6 445 km²。研究区隶属典型暖温带半湿润季风气候,夏季盛行西南风,冬季盛行西北风,四季分明,雨热同期,多年平均温度 12.9℃,多年平均降水量约为 585 mm。近年来,由人类活动导致的湿地生态系统退化^[27]、环境质量下降等^[28]问题严重影响黄河三角洲生态系统安全与可持续发展。基于研究目的与数据的可获取性,本研究区域为东营区、河口区、垦利区和利津县。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本研究采用 USGS 提供的 1998 年、2004 年、2011 年、2018 年 4 期 Landsat TM/OLI 数据,分辨率为 30 m。

应用 ENVI 对影像进行几何精校正、大气校正、辐射校正、裁切等预处理,控制校正误差在 1 个像元以内,使用面向对象分类法,经人机交互修正后提取土地利用空间位置分布信息。依据《中国土地利用现状分类<GB/T21010-2017>》将研究区土地利用类型分为草地、林地、水域、建设用地、未利用地和耕地 6 个一级类型以及 13 个二级类型(表 1)。通过实地考察并结合高分辨率影像(Google Earth)获取 450 个校正样本验证解译精度,均在 90%以上,符合研究需要。

表 1 土地利用类型分类

一级类型	二级类型
耕地	—
草地	天然牧草地、人工牧草地
林地	有林地、灌木林地、未成林造林地
水域	盐田、滩涂、河流、水库、坑塘
未利用地	—
建设用地	农村居民地、城镇居民地、工矿用地

本文依据指标选取的全面性、主导性、代表性以及资料可获取性原则,结合专家知识以及黄河三角洲的特性从自然、经济社会方面选取与人地协调度变化联系较大的指标,构建影响因子指标体系^[29-31]。人地协调的指标体系系统层包括人类活动与自然环境两个方面,其中人类活动系统层包括人口规模、经济发展水平、居民收支水平、产业结构 4 个表达层,自然环境系统包括自然资源禀赋、自然环境特征两个表达层。基于此,影响因子选取人口、GDP、城镇化率、财政支出、固定资产投资总额、第一二三产业产值、人均耕地面积、人均水资源、人均建设用地面积、DEM、坡度、年均蒸发量、年均降水量、植被覆盖度等 16 个指标(表 2)。在上述数据处理时,人文数据按行政区划整合,自然数据按栅格单元整合。相关研究数据均源于 1998—2018 年的《东营市年鉴》、《河口年鉴》、《利津年鉴》、《垦利年鉴》、《东营区年鉴》以及中国科学院资源环境科学与数据中心。

2.2 研究方法

2.2.1 人地协调度模型 人地协调度的计算包含“人”与“地”两个方面的协调^[32-33]。因此,本文通过人类活动强度 HAILS 与生态承载力 ECC 两个变量构建人地协调度的计算模型。其中,人类活动强度是衡量区域人类活动对自然环境的影响程度^[34],代表人地系统中“人”对“地”的影响;生态承载力代表自然环境对人类活动的耐受能力^[35],即“地”对“人”的制约性。经过无量纲化处理后,计算两个变量间的协调程度即代表人地协调度。

① 建设用地当量法。人类活动强度的计算采用徐勇等^[25]提出的建设用地当量(CLE, Construction

land equivalent)模型和土地利用/土地覆被类型的建设用地当量折算系数(CI, Conversion index of construction land equivalent)算法,其公式如下:

$$HAILS=\frac{S_{CLE}}{S}\times 100\%$$
 (1)

$$S_{CLE}=\sum_{i=1}^n(SL_i\times CI_i)$$
 (2)

式中:HAILS(Human activity intensity of land surface)指地表人类活动强度; S_{CLE} 为建设用地当量面积; S 为研究区域总面积; SL_i 为第 i 种土地利用/土地覆被类型面积; CI_i 为该种土地利用/覆被类型的折算系数(表 3); n 为研究区域内土地利用类型的总数。

表 2 黄河三角洲人地协调度时空演变影响因子体系

系统层	表达层	指标名称	单位
人类活动	人口规模	人口数量	万人
		GDP	亿元
	经济发展水平	人均建设用地面积	人/km ²
		城镇化率	%
	收支水平	固定资产投资总额	万元
		财政收入	万元
		第一产业产值	亿元
	产业结构	第二产业产值	亿元
		第三产业产值	亿元
自然环境	自然资源禀赋	人均水资源	人/km ²
		人均耕地面积	人/km ²
	自然环境特征	DEM	m
		坡度	(°)
		年均降水量	mm
		年均蒸发量	mm
		植被覆盖率	%

在人类活动强度计算过程中,不同土地利用/覆被类型设定折算系数不同。按照人类活动对地表改造程度的大小依次为建设用地、耕地、水域、林地、草地、未利用地,分别设定其当量折算系数(表 3)。其中,水域包括水库、盐田、坑塘、河流和滩涂 4 个部分,分别对应折算系数为 0.6,0.6,0.067,0,0。

表 3 黄河三角洲不同土地利用类型建设用地当量折算系数

土地利用/覆被类型	CI
耕地	0.200
林地	0.133
草地	0.067
建设用地	1.000
水域	0.600/0.067/0.000
未利用地	0.000

② 产量、均衡因子法。黄河三角洲生态承载力的计算采用产量、均衡因子法。由于区域特征的差异,生物生产能力不同,因此,区域生态承载力的计算需经过均衡化处理,将其转化为相同生产力的生产土地面积,以便加总。参考黄河三角洲区域特征,结合

生态足迹模型、统计年鉴数据以及 FAO 数据库,确定其产量因子与均衡因子(表 4),其计算公式如下:

$$ECC_i = \sum_{i=1}^n S_i \times B_i \times Y_i \tag{3}$$

式中: ECC_i 为区域 i 的生态承载力; Y_i , B_i 分别为区域的产量因子和平衡因子; S_i 为该区域的面积,在计算生态承载力时,扣除 12%生物多样性保护。

表 4 不同土地利用类型的产量因子和均衡因子

土地利用类型	均衡因子	产量因子
建设用地	2.80	1.66
耕地	2.80	1.66
林地	1.10	0.91
水域	0.20	1.00
草地	0.50	0.19
工矿用地	1.10	0.00
未利用地	0.00	0.00

③ 人地协调度计算方法。人地协调度计算通过测度人类活动强度与生态承载力的耦合程度来表示。模型计算结果主要包括耦合度、协调度、协调系数 3 个部分,计算公式如下:

$$C_i = \sqrt{\frac{HAILS_i ECC_i}{(HAILS_i + ECC_i)}} \tag{4}$$

$$T_i = \sqrt{\alpha HAILS_i \times \beta ECC_i} \tag{5}$$

$$D_i = \sqrt{C_i \times T_i} \tag{6}$$

式中: $HAILS_i$ 是区域 i 的人类活动强度; ECC_i 为 i 区的生态承载力。 C_i 为黄河三角洲人类活动强度与生态承载力的耦合度,取值在 0 到 1 之间。 T_i 表示综合协调系数, α 和 β 分别为两个不定参数($\alpha + \beta = 1$),由于在人地系统中人与自然的同样地位,确定 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 D_i 为人地协调度, $D_i \in [0, 1]$ 。参考相关研究^[36]将协调度 D 计算结果分为严重失调(0~0.2)、相对失调(0.2~0.4)、低等协调(0.4~0.6)、良好协调(0.6~0.8)、优质协调(0.8~1)。

2.2.2 地理探测器 地理探测器探测研究变量的空间分异性,并揭示其时空演变驱动力的统计学方法。主要包括分异因子探测、交互作用探测、生态探测以及风险探测 4 个部分^[37]。本文应用地理探测器模型中分异因子探测器与交互作用探测器,对黄河三角洲人地协调度时空演变的驱动力进行分析。分异因子探测器可对人地协调度的空间分异性及所选影响因子对人地协调度的解释程度,其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{7}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{8}$$

$$SST = N \sigma^2 \tag{9}$$

式中: q 是各影响因素对人地协调度的时空演变解释力; σ^2 为所选因子的离散方差; N 为区域单元数; L 为因子种类数量; N_h 和 σ_h 为区域 h 的样本量和离散方差。 q 取值范围[0~1], q 值越大表明影响因子对人地协调度时空演变的解释力越大。

交互作用探测器可识别两个不同影响因子的共同作用对人地协调度的解释力,即通过对比单变量 q 值和双变量 q 值的大小关系来判断两变量共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的影响程度,是该方法区别于传统统计学方法的最大特点,判断依据见表 5。

表 5 各影响因子交互作用判断依据及其交互作用方式

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 黄河三角洲人地协调模型计算结果与分析

3.1.1 黄河三角洲人地协调度时空演变分析 黄河三角洲人地协调度计算结果表明(表 6),研究时段内区域内人地协调度水平不断提升:失调区域面积下降显著,协调区域面积逐渐上升。研究初期,黄河三角洲人地关系较为紧张,人地协调度整体水平较低,主要人地关系特征为良好协调,区域面积达 2 847.57 km²,占研究区总面积的 44.15%。但相对失调与严重失调区域面积仍较高,面积分别为 1 123.91 km², 1 209.67 km²。较为特殊的是 1998—2004 年研究区人地协调度水平显著下降,人地关系失调的区域面积呈上升趋势,其中相对失调区域面积上升最为显著,较 1998 年面积上升了 807.24 km²,低等协调与良好协调面积均有下降。自 2004 年后人地协调度逐步上升,低等协调、良好协调、优质协调区域面积逐步增加,人地关系逐渐缓和。

表 6 1998—2018 年不同等级人地协调度区域面积变化

	km ²				
年份	严重失调	相对失调	低等协调	良好协调	优质协调
1998	1209.67	1123.91	771.68	2847.57	492.91
2004	1362.74	1931.15	588.55	1978.48	584.78
2011	609.05	971.77	1103.32	3037.69	723.91
2018	493.63	667.05	1284.56	3194.59	805.92
1998—2018	-715.06	-457.87	512.44	350.45	310.01

从空间分布格局来看(图 1),研究时段内黄河人地协调度时空分布特征大致为内陆协调水平较高,沿海协调水平较低。其中协调水平高值区存在明显扩张现象,

良好协调区域与优质协调区域越发集中连片,主要分布于内陆近黄河地区;失调区域逐步向沿海消退,最终缩减至自然保护区两个分区处。黄河三角洲内陆为人类居住和活动的主要场所,研究时段内,各地区开发建设基本完善并逐步开始恢复、保护生态环境,因此良

好协调区域和优质协调区域主要分布于内陆区域并呈扩张趋势;由于自然灾害与产业转型等原因,沿海生态环境脆弱区域承载过度人类活动^[38],因此处于失调状态。但随着科学技术的进步与相关政策的调节,人地矛盾逐步缓和,沿海区域协调水平逐渐提升。

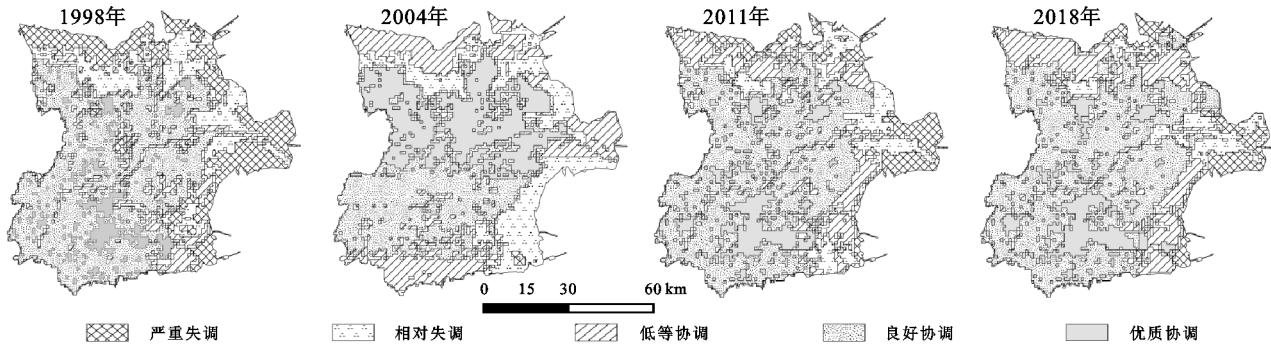


图 1 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度时空分布

3.1.2 黄河三角洲各乡镇人地协调度等级时空演变分析 1998—2018 年,黄河三角洲各乡镇人地协调度等级空间格局变化显著(图 2),总体呈自黄河沿岸向周围递减的空间分布特征。整体上看,黄河三角洲各乡镇协调度等级较低,低协调等级区域分布最为广泛。研究初期,大部分乡镇处于失调状态,部分沿黄河乡镇人地协调等级较高。2004 年,研究区西部和

南部各乡镇协调等级有所下降,除黄河口镇外,东部沿海及其周边乡镇仍处于失调状态。至 2018 年,研究区各乡镇主要人地关系等级仍为低协调,但各乡镇协调度水平均有提升,人地关系有所改善。高等级协调区域逐步向研究区中部至黄河两岸汇集,表明在政府与国家政策的宏观调控下,沿黄河各乡镇人地关系均有所改善且政策响应良好^[39]。

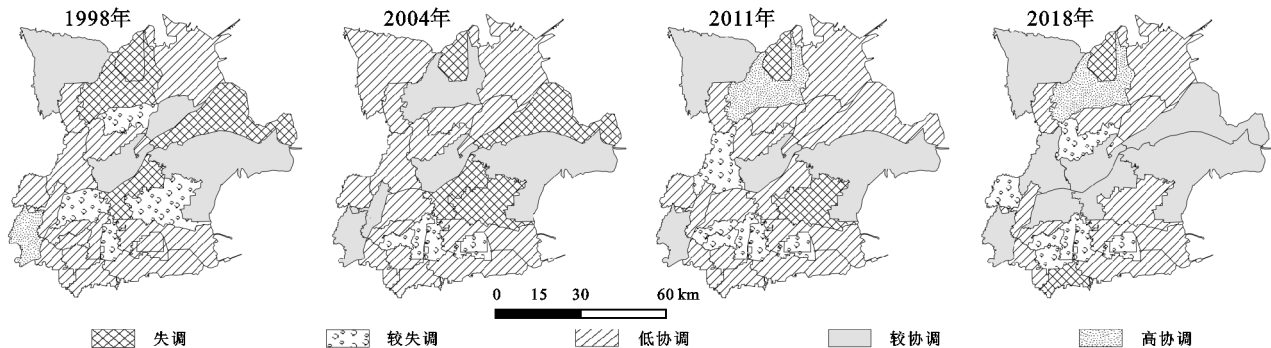


图 2 1998—2018 年黄河三角洲各乡镇人地协调度等级分布

黄河三角洲各乡镇人地协调度测算结果(表 7)表明,1998 年以来黄河三角洲各乡镇人地协调水平较高,平均值在 0.5(良好协调)上下波动,协调水平较为稳定。各乡镇协调度水平差异显著。研究初期乡镇协调度极差值为 0.51,至 2018 年缩减至 0.24,表明研究时段内各乡镇人地协调水平差距逐步缩减,总体协调水平有提升趋势。总体来看,1998—2018 年间乡镇协调度水平呈下降趋势,各乡镇协调度演变差异明显。六合镇、胜坨镇、垦利街道、永安镇、河口街道、六户镇以及盐窝镇人地协调度呈上升趋势,其中六合镇、胜坨镇、垦利街道和永安镇增长水平最为显著,增长值分别为 0.27,0.26,0.25,0.24;新户镇人地协调度虽有波动但近 20 年间无明显变化;其余乡镇协调水平均呈下降趋势,汀罗镇、东城街道、刁口乡、郝家镇、黄河路街道、牛庄镇和史口

镇协调水平下降最为明显,下降值分别为 0.24,0.17,0.17,0.16,0.13,0.12,0.12,其余乡镇下降幅度较小。

3.2 地理探测器结果与分析

3.2.1 分异因子探测器结果与分析 地理探测器因子探测结果表明(图 3),黄河三角洲人地协调度水平与人均水资源密切相关。总体来看,1998—2018 年人均水资源、年均降水量、植被覆盖率与人口数量是人地协调度时空演变的主导因素,但不同因子的解释力 q 值不高。2018 年各因子对人地协调度时空分异的解释能力顺序为:人均水资源(1.121 3)、植被覆盖率(0.074 2)、年均降水量(0.066 2)、人均建设用地面积(0.061 2)、人均耕地面积(0.047 1)、DEM(0.034 7)、第一产业产值(0.034 7)、人口数量(0.033 8)、固定资产投资总额(0.032 1)、城镇化率(0.030 7)、第二产业产值

(0.030 6)、财政收入(0.026 6)、年均蒸发量(0.025 2)、GDP(0.024 9)、第三产业产值(0.017 7)、坡度(0.000 7)。其中,人均水资源、植被覆盖率和年均降水量对 人地协调度影响最大,因此,修复与保护区域自然环境是黄河三角洲人地协调发展的关键途径。

表 7 1998—2018 年黄河三角洲各乡镇协调度变化

乡镇	1998 年	2004 年	2010 年	2018 年	1998—2018 年
北宋镇	0.81	0.75	0.77	0.78	−0.03
黄河口镇	0.80	0.79	0.78	0.78	−0.02
陈庄镇	0.80	0.74	0.76	0.77	−0.03
河口街道	0.73	0.78	0.85	0.86	0.13
新户镇	0.62	0.56	0.62	0.62	0.00
孤岛镇	0.61	0.56	0.58	0.56	−0.05
仙河镇	0.58	0.52	0.57	0.52	−0.06
胜利街道	0.57	0.51	0.52	0.50	−0.07
龙居镇	0.54	0.50	0.53	0.46	−0.08
义和镇	0.54	0.47	0.50	0.45	−0.09
汀罗镇	0.54	0.48	0.49	0.30	−0.24
盐窝镇	0.53	0.58	0.36	0.63	0.10
董集镇	0.49	0.42	0.38	0.43	−0.06
利津街道	0.48	0.65	0.46	0.44	−0.04
明集乡	0.47	0.44	0.45	0.39	−0.08
牛庄镇	0.47	0.42	0.41	0.35	−0.12
史口镇	0.47	0.41	0.41	0.35	−0.12
黄河路街道	0.45	0.38	0.37	0.32	−0.13
刁口乡	0.45	0.33	0.25	0.28	−0.17
东城街道	0.44	0.37	0.32	0.27	−0.17
垦利街道	0.43	0.51	0.59	0.68	0.25
六户镇	0.43	0.49	0.50	0.50	0.07
辛店街道	0.42	0.36	0.38	0.34	−0.08
郝家镇	0.41	0.36	0.34	0.25	−0.16
文汇街道	0.39	0.33	0.33	0.33	−0.06
胜坨镇	0.38	0.44	0.53	0.64	0.26
六合街道	0.31	0.44	0.48	0.58	0.27
永安镇	0.30	0.31	0.34	0.54	0.24
平均值	0.52	0.49	0.50	0.48	−0.02
极差	0.51	0.44	0.43	0.24	—

近 20 年来,各影响因子对黄河三角洲人地协调度的解释力变化显著,经济发展水平、自然资源禀赋和自然环境特征在人地协调度演进中重要程度逐步上升(表 8)。其中,人均建设用地面积、DEM、人均水资源、年均蒸发量、第三产业产值与城镇化率 q 值增长最为显著,较 1998 年分别上升了 0.026 7,0.018 2,0.012 3,0.011 8,0.010 2,0.010 1。建设用地的扩张是人类活动系统中经济发展的主要表现形式,随着经济的发展,人类活动辐射范围逐步增加,对区域自然环境产生负面效应。尤其在 1998—2018 年,黄河三角洲经济发展迅速,扩张建设用地等人类活动对其周围自然环境特征与资源禀赋改造作用加深,加深区域人地矛盾。因此研究时段内,经济发展水平、自然资源禀赋和自然环境特征

对研究区人地协调度的解释力逐步上升。

3.2.2 交互作用探测器结果与分析 人地协调度的空间分异是由多个因子综合作用的结果,各影响因子交互探测的结果表明(图 4),1998—2018 年各因子间交互作用对研究区人地协调度解释力均呈增强趋势。影响因子间交互作用方式主要包括非线性增强、双因子增强与单因子非线性减弱。

研究时段内,大部分因子间交互作用方式主要为非线性增强,双因子增强作用方式逐渐增多。特殊的是 1998 年间,坡度分别与第一产业产值、第三产业产值和城镇化率的交互作用呈现单因子非线性减弱作用方式,表明其交互作用对人地协调度的解释力不高。1998—2004 年部分自然资源禀赋、经济发展水平和自然环境特征指标因子间交互作用为双因子增强,例如人均耕地面积分别与人均建设用地面积和年均降水量交互作用、DEM 分别与人均耕地面积、城镇化率、GDP 和年均降水量交互作用、年均降水量与 GDP 交互作用、人均建设用地面积和植被覆盖率交互作用等。至 2018 年,人均水资源与除人均耕地面积和第三产业产值外其他因子,人均建设用地面积与人口、DEM 与人均耕地面积、第一产业产值、财政收入、人口交互作用结果均为双因子增强,表明自然资源禀赋、经济发展水平与自然环境特征因子间交互作用对人地协调度影响程度逐步提升,人均水资源、人均建设用地面积、DEM 与其他部分因子间交互作用对人地协调度解释力越来越高。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文基于耦合协调度模型与地理探测器探讨了 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度时空分布,发现近 20 年来黄河三角洲人地协调度水平较低,但整体呈上升趋势。部分学者应用区域开发强度 RDI 与资源环境水平指数 REI 之间的耦合协调度^[40],反映黄河三角洲地区人地协调度。虽选取进行耦合评估的变量有所差异,但研究结果均一致表明黄河三角洲人地关系处于低级协调水平以及良性发展的趋势。

人地协调度是人类活动与自然环境之间相互作用的结果,是对区域人地关系与可持续发展现状的定量评价。黄河三角洲人地协调度空间分布结果表明,随着黄河流域以及黄河三角洲相关政策的规划,人地矛盾逐步缓和。驱动力结果表明自然环境相关因子在其演化过程中占主体地位,随着经济水平的提高,人类活动在人地协调关系中的重要程度不断上升,有逐步占据主体地位的趋势。根据人地关系的基本理

论演进过程,人类活动与自然环境在人地关系中的主体地位是不断变化的,即从自然环境占主体地位—人类活动占主体地位—人与环境地位平等。可以看出

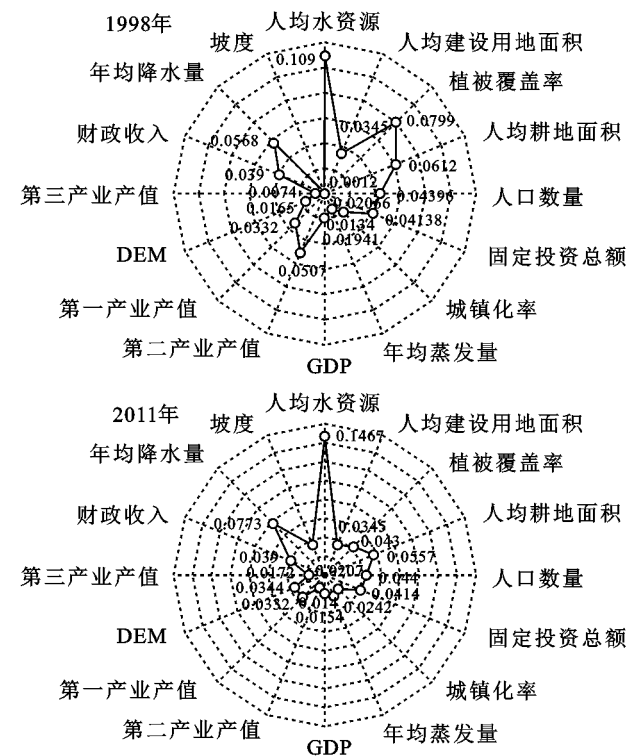


图 3 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度空间分异影响因子探测结果

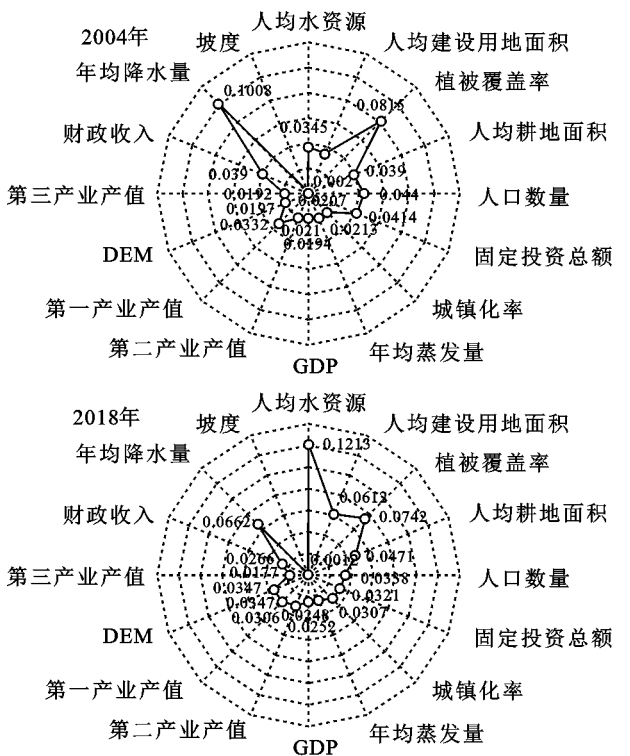
届时研究区域内人地协调度仍处于较低水平,人地关系等同于工业革命前后人类活动逐步占据主体地位时期。为提高人地协调度水平,可提高人均水资源拥有量、植被覆盖率,同时控制人口数量增长、平衡产业结构。在今后的人地关系发展中,需保持自然环境主体地位的同时合理控制人类活动增长趋势,根据区域发展现状以及主要人类活动方式制定合理政策进行宏观调控,从而加速人地关系进程。同时,在未来的 人地关系研究中,应用耦合协调度模型对人地关系的量化评估前,可先对区域人地关系现状进行初步评估以确定 α 与 β 值,由于不同研究区域人地关系发展阶段不同,人类活动与 自然环境的主体地位也不同,恰当的 调整 α, β 参数值,可更加确切的反映区域内人地关系的变化。

4.2 结论

(1) 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度格局演变剧烈,失调区域面积逐步下降,协调区域面积逐渐上升,整体呈良好协调水平。其中良好协调区域面积增加幅度最大,共增加 512.44 km²。严重失调区域面积缩减最为显著,至 2018 年减少至 493.63 km²,共减少了 715.06 km²。人地协调度空间格局呈自内陆向沿海递减的特点,协调区域逐渐扩张且愈发集中连片,人地关系逐步缓和。

(2) 研究时段内,各乡镇协调度水平等级较高,

研究时段内黄河三角洲人地关系处于第一阶段到第二阶段的过渡时期,虽人地关系逐步缓和,但距人地协调发展仍有一段距离。



协调水平变化较为稳定,但乡镇间协调等级差异明显且协调水平差距逐渐减小。1998 年各乡镇人地协调度极差值达 0.51,至 2018 年缩减至 0.24。其中六合镇、胜坨镇、垦利街道、永安镇、河口街道、六户镇以及盐窝镇协调水平呈上升趋势,除新户镇外,其他乡镇协调水平均呈下降趋势,下降幅度不大。各乡镇协调度空间分布特征呈自黄河沿岸向四周递减的分布特征,且逐渐有上升趋势。

表 8 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度影响因子变化

系统层	表达层	指标名称	1998—2018 年
人类活动	人口规模	人口数量	-0.0101
		GDP	0.0055
	经济发展水平	人均建设用地面积	0.0267
		城镇化率	0.0101
		固定投资总额	-0.0093
		财政收入	-0.0125
	产业结构	第一产业产值	0.0015
		第二产业产值	-0.0201
		第三产业产值	0.0102
自然环境	自然资源禀赋	人均水资源	0.0123
		人均耕地面积	-0.0141
	自然环境特征	DEM	0.0182
		坡度	-0.0005
		年均降水量	0.0094
		年均蒸发量	0.0118
		植被覆盖率	-0.0037

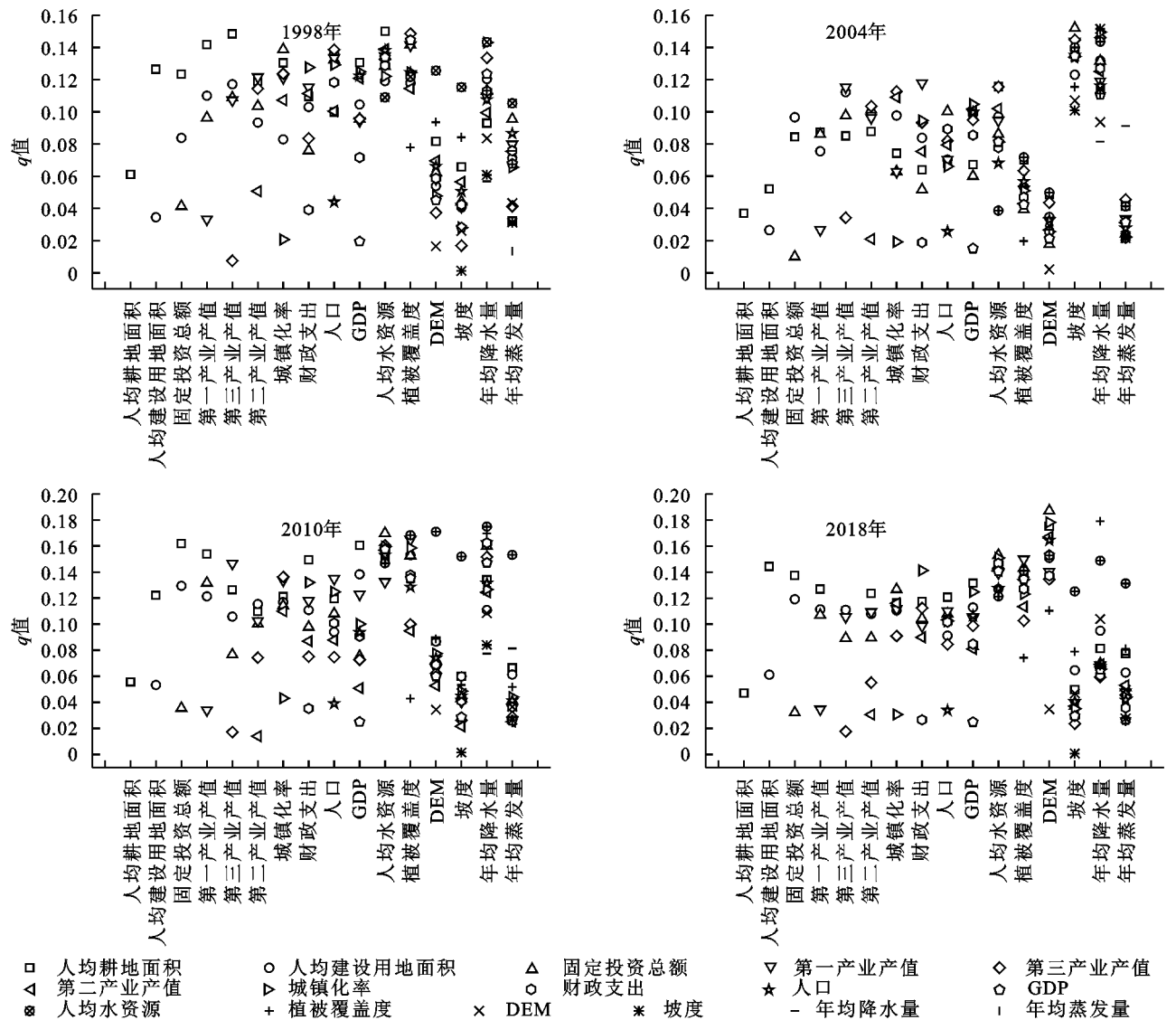


图 4 1998—2018 年黄河三角洲人地协调度因子交互作用探测结果

(3) 黄河三角洲人地协调度演变的主要影响因素是人均水资源、年均降水量、植被覆盖率与人口数量。研究时段内各影响因素对人地协调度空间分异的解释能力变化明显,GDP、人均建设用地面积、城镇化率、第一产业产值、第三产业产值、人均水资源、DEM、年均蒸发量与年均降水量 q 值呈上升趋势,其余因子 q 值结果均下降。其中,人均建设用地面积、DEM、人均水资源 q 值增长最为显著,较 1998 年分别上升了 0.026 7,0.018 2,0.012 3。

(4) 1998—2018 年各因子间交互作用对研究区人地协调度的解释力均呈增强趋势,主要作用结果有非线性增强、双因子增强和单因子非线性减弱 3 种方式。大部分因子间交互作用为非线性增强,仅在 1998 年间出现单因子非线性减弱作用。2004—2018 年,双因子增强作用逐步增多。至 2018 年,人均水资源与除人均耕地面积和第三产业产值外的其他因子;人均建设用地面积与人口;DEM 与人均耕地面积、第

一产业产值、财政收入、人口交互作用结果均为双因子增强。

参考文献:

- [1] 杨君,郝晋珉,匡远配,等.基于和谐思想的人地关系研究述评[J].生态经济,2010(1):186-190.
- [2] 樊杰.“人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石[J].地理学报,2018,73(4):597-607.
- [3] 刘彦随.现代人地关系与人地系统科学[J].地理科学,2020,40(8):1221-1234.
- [4] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: Grand challenges[J]. Science, 2010,330(6006):916-917.
- [5] 贺瑜,邵超峰,周海林,等.可持续发展视角下“稀缺性类型”转变的现象分析[J].中国人口·资源与环境,2020,30(12):38-44.
- [6] Turner B L, Sabloff J A. Classic Period collapse of the Central Maya Lowlands: Insights about human-environment relationships for sustainability[J]. Proceedings of

- the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012,109:13908-13914.
- [7] 程钰,任建兰,徐成龙.生态文明视角下山东省人地关系演变趋势及其影响因素[J].中国人口·资源与环境, 2015,25(11):121-127.
 - [8] Yang Yu, Li Xiaoyun, Dong Wen, et al. Assessing China's human-environment relationship[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(8):1261-1282.
 - [9] 陆大道,樊杰.区域可持续发展研究的兴起与作用[J].中国科学院院刊,2012,27(3):290-300,319.
 - [10] Pucci S, Pantosti D, De Martini P M, et al. Environment-human relationships in historical times: The balance between urban development and natural forces at Leptis Magna (Libya) [J]. Quaternary International, 2011,242:171-184.
 - [11] Turner II B L, Lambin EF, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. Proceedings of Natural Academy of Sciences of United States of America, 2007,104(52):666-671.
 - [12] Kocsis T. Looking through the dataquadrant: characterizing the human-environment relationship through economic, hedonic, ecological and demographic measures [J]. Journal of Cleaner Production, 2012,35:1-15.
 - [13] Riddiford N G, Branch N P, Jusseret S, et al. Investigating the human-environment relationship of early intensive salt production: A case study from the Upper Seille Valley, Lorraine, northeast France[J]. Journal of Archaeological Science, 2016,10:390-402.
 - [14] 李小云,杨宇,刘毅.中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展[J].地理学报,2016,71(12):2067-2087.
 - [15] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003,100(14):8074-8079.
 - [16] 郑度.21 世纪人地关系研究前瞻[J].地理研究,2002, 21(1):9-13..
 - [17] 李小云,杨宇,刘毅.中国人地关系的历史演变过程及影响机制[J].地理研究,2018,37(8):1495-1514.
 - [18] 李扬,汤青.中国人地关系及人地关系地域系统研究方法述评[J].地理研究,2018,37(8):1655-1670.
 - [19] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Change, 2007,17(3/ 4):472-485.
 - [20] 王武科,李同升,徐东平,等.基于 SD 模型的渭河流域关中地区水资源调度系统优化[J].资源科学,2008,30 (7):983-989.
 - [21] 王黎明.面向 PRED 问题的人地关系系统构型理论与方法研究[J].地理研究,1997,16(2):39-45.
 - [22] 牛高华,赵言文,施毅超.1996—2004 年长江三角洲区 域人地协调度演变分析[J].水土保持通报,2008,28 (3):167-172.
 - [23] 刘凯,任建兰,张宝雷.黄河三角洲人地系统脆弱性演化特征及其影响因素[J].经济地理,2019,39(6):198-204.
 - [24] 陈兴鹏,逯承鹏,杨静,等.基于生态足迹模型的宁夏 1986—2005 年人地协调度演变分析[J].干旱区资源与 环境,2011,25(10):15-20.
 - [25] Xu Yong, Xu Xiaoren, Tang Q. Human activity intensity of land surface: Concept, methods and application in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26 (9):1349-1361.
 - [26] 赵立君,杨帆,王楠,等.基于生态足迹模型的贵州省仁 怀市可持续发展及其影响因素研究[J].生态与农村环 境学报,2021,37(7):870-876.
 - [27] 陈琳,任春颖,王宗明,等.黄河三角洲滨海地区人类干 扰活动用地动态遥感监测及分析[J].湿地科学,2017, 15(4):613-621.
 - [28] 王学金,陈立强,宋玉敏,等.人类活动及自然因素对黄 河口三角洲湿地生态系统影响分析[J].中国人口·资 源与环境,2012,22(S1):224-226.
 - [29] 刘康,闫家国,邹雨璇,等.黄河三角洲盐地碱蓬盐沼的 时空分布动态[J].湿地科学,2015,13(6):696-701.
 - [30] 许珺,徐阳,胡蕾,等.基于位置大数据的青藏高原人类 活动时空模式[J].地理学报,2020,75(7):1406-1417.
 - [31] 席海燕,王圣瑞,郑丙辉,等.流域人类活动对鄱阳湖生态 安全演变的驱动[J].环境科学研究,2014,27(4):398-405.
 - [32] Ahmed Z, Wang Z, Mahmood F, et al. Does globaliza- tion increase the ecological footprint? Empirical evi- dence from Malaysia [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(18):18565-18582.
 - [33] David Vaká. Ecological Footprint, environmental per- formance and biodiversity: A cross-national compari- son[J]. Ecological Indicators, 2012,16(2):40-46.
 - [34] Chi Y, Liu D, Xing W, et al. Island ecosystem health in the context of human activities with different types and intensities [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,281,125334.
 - [35] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等.典型资源型城市生态承载力 评价:以唐山市为例[J].生态学报,2015,35(14): 4852-4859.
 - [36] 张明斗,张蕊.东北地区城市韧性 with 城市土地利用效益的 耦合协调研究[J].工业技术经济,2021,40(9):105-114.
 - [37] 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.
 - [38] 朱纹君,韩美,孔祥伦,等.1990—2018 年黄河三角洲人 类活动强度时空格局演变及其驱动因素[J].水土保持 研究,2021,28(5):287-292,300.
 - [39] 连煜.坚持黄河高质量生态保护,推进流域高质量绿色 发展[J].环境保护,2020,48(Z1):22-27.
 - [40] 程钰,王亚平,张玉泽,等.黄河三角洲地区人地关系演变 趋势及其影响因素[J].经济地理,2017,37(2):83-97.