

河北省 2010—2020 年生态产品价值空间 演变特征及其影响因素

代汝磊¹, 梁彦庆^{1,2,3}, 黄志英⁴, 董高洁¹, 顾世杰¹

(1.河北师范大学 地理科学学院, 河北 石家庄 050024; 2.河北省环境演变与生态建设实验室, 河北 石家庄 050024; 3.河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 河北 石家庄 050024; 4.河北地质大学 土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: [目的] 评估河北省生态产品价值(EPV), 探索其空间演变背后的驱动因子, 为构筑京津冀生态安全屏障, 加快生态文明建设提供科学依据。[方法] 基于当量因子法核算 2010、2015、2020 年河北省 168 个县区的 EPV, 利用全局莫兰指数、高/低聚类指数、热点分析法分析其空间分布演变和聚类演变特征, 并借助地理探测器探测其主要驱动力。[结果] ①2010—2020 年河北省 EPV 均突破 3.80×10^{11} 元, 整体上大幅提高, 呈先平稳后急速上升的态势, 到 2020 年突破 4.20×10^{11} 元; 林地 EPV 最高, 始终是所占比例最大的生态产品类型, 水域次之且始终是变化量和变化率最大的类型。②2010—2015 年 EPV 空间分布呈现出北高南低, 西高东低的特征, 高值集中于北部的燕山、坝上高原地区和西部的太行山地区, 低值集中于东南部的河北平原地区; 2015—2020 年呈现出北高南低, 东西高, 中部低的特征。③2010—2020 年空间聚类表现为显著高值集聚, 冷热点分布呈现与空间分布相似的规律。④从单因子探测看, CO 表面浓度、O₃ 浓度、年均气温是 EPV 空间演变的主导因子, 人均 GDP 次之, 社会因子的解释力相对最弱; 从双因子交互探测看, 3 期中起主导作用的组合因子分别是人均 GDP \cap NO₂ 表面浓度、高程 \cap O₃ 浓度和人均 GDP \cap CO 表面浓度, 其解释度(q 值)分别为 0.71, 0.73, 0.66。[结论] 林地和水域对提高生态产品价值具有重要作用, 但空间上差距较大, 为使其产生更加积极变化, 不仅要考虑生态单因子的强大驱动力, 也应充分认识驱动力来源的复杂性和非线性。

关键词: 生态产品价值; 空间演变; 驱动力; 当量因子法; 地理探测器; 河北省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0247-12

中图分类号: X171.1, F301.2

文献参数: 代汝磊, 梁彦庆, 黄志英, 等. 河北省 2010—2020 年生态产品价值空间演变特征及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 247-258. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230925.001; Dai Rulei, Liang Yanqing, Huang Zhiying, et al. Spatial evolution characteristics and affecting factors of ecological product value in Hebei Province from 2010 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 247-258.

Spatial Evolution Characteristics and Affecting Factors of Ecological Product Value in Hebei Province from 2010 to 2020

Dai Rulei¹, Liang Yanqing^{1,2,3}, Huang Zhiying⁴, Dong Gaojie¹, Gu Shijie¹

(1.School of Geographic Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

2.Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

3.Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang, Hebei

050024, China; 4.School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: [Objective] The ecological product values (EPV) in Hebei Province were evaluated and the driving factors of their spatial change were also explored, in order to provide a scientific foundation for establishing an ecological security barrier in the Beijing-Tianjin-Hebei region while expediting ecological civilization

收稿日期: 2022-10-06

修回日期: 2023-06-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“多尺度城市地价分异规律”(41471090); 河北省引进留学人员资助项目(C20230510); 河北省文化艺术科学规划和旅游研究项目(HB23-YB063)

第一作者: 代汝磊(1997—), 男(汉族), 河北省沧州市人, 硕士研究生, 研究方向为区域经济与土地利用。Email: 569900406@qq.com。

通信作者: 梁彦庆(1979—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 博士, 副教授, 主要从事资源评价与规划、区域经济与土地利用等方面的研究。Email: liangyanqing@126.com。

development. [Methods] The EPV were computed for 168 counties in Hebei Province during 2010, 2015, and 2020 by use of the equivalent factor method. Spatial distribution evolution and clustering characteristics were analyzed utilizing the global Moran index, high/low clustering index, and the hotspot analysis method. Geographic detector was employed to identify the primary driving forces. [Results] ① Between 2010 and 2020, Hebei Province's EPV surpassed 3.80×10^{11} yuan, exhibiting notable overall improvement. EPV exhibited a pattern of gradual increase followed by rapid growth, exceeding 4.20×10^{11} yuan by 2020. Forest land had the highest EPV, consistently dominating the ecological product types. Water areas had the next highest EPV, and experienced the most substantial changes in both amount and rate. ② During 2010 to 2015, EPV's spatial distribution exhibited a north-south and west-east dichotomy, with high values concentrated in the Northern Yanshan and Bashang Plateau regions, as well as in the Western Taihang Mountain area, while lower values clustered in the Southeastern Hebei Plain. During 2015 to 2020, the north-south divide persisted, with added east-west variation and central low values. ③ From 2010 to 2020, significant high-value clustering was observed spatially, mirroring the distribution pattern of cold and hot spots. ④ Single-factor analysis identified CO surface concentration, O₃ concentration, and average annual temperature as primary influencers of EPV's spatial evolution. Per capita GDP emerged as the secondary vital factor, while the impact of social factors remained comparatively weak. Dual-factor interaction analysis revealed that the leading combinations of factors during the three periods were per capita GDP \cap NO₂ surface concentration, elevation \cap O₃ concentration, and per capita GDP \cap CO surface concentration, with corresponding *q* values of 0.71, 0.73, and 0.66, respectively. [Conclusion] While forest land and water areas hold pivotal roles in augmenting EPV, significant spatial disparities exist. To drive more positive transformations, it is essential to not only consider robust ecological single-factor drivers, but also to comprehensively grasp the intricate and nonlinear nature of driving force origins.

Keywords: ecological product value; spatial evolution; driving force; equivalent factor method; geographic detector; Hebei Province

生态产品价值(ecological product values, EPV)核算作为践行生态文明思想和“绿水青山就是金山银山”理论的基础研究之一,已成为支撑中国生态文明体制改革的前沿领域和重要基础^[1]。进行 EPV 核算,首先要明确生态产品的概念和内涵,国务院于 2010 年印发的《全国主体功能区规划》中指出,“生态产品指维系生态安全、保障生态调节功能、提供良好人居环境的自然要素,包括清新的空气、清洁的水源和宜人的气候等”^[2],该概念与 2001 年《千年生态系统评估报告》^[3]中的“生态系统服务”概念相比,是一种偏广义的定义^[4]。2015 年中共中央、国务院出台《关于加快推进生态文明建设的意见》(以下简称“《意见》”),成为推动中国生态文明建设的纲领性文件^[5]。2021 年中办、国办印发《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》,对生态产品价值实现提出新要求、新规范,力图走一条生态优先、绿色发展的新路子^[6]。生态产品价值正在成为生态学 and 经济学相关领域的研究前沿和热点之一^[7]。

国内外在该领域的研究主要集中于概念界定、评估方法、指标体系、实现机制等方面^[8-9]。如刘江宜等^[10]揭示了生态产品的基本内涵与争议,划分了评

估方法与实现机制的类型;Wang Yongyang 等^[11]基于能值的生命周期评估(Em-LCA)框架,探索了农业生态系统的实施路径。具体研究多为跨行政区大尺度的重点生态功能区^[12]、重要流域^[13]及森林^[14]、草地^[15]、水域等^[16]单类型 EPV 核算。例如,李芬等^[2]从物质和价值量两个角度构建测算方法核算了三江源的生态产品价值;李子等^[13]基于 InVEST 模型分析了渭河流域干支流生态系统服务的时空动态变化;Duan Kai 等^[17]解析了气候变化给森林和草原在提供生态系统服务方面带来的差异性影响。价值核算对于价值实现具有基础性作用,但全国范围内对全类型、县区尺度 EPV 的核算还很有限,缺少从更微观视角掌握生态资源本底的研究,不利于生态保护政策的具体制订与实施;在核算的时间期限上以单一年份居多,不能充分体现研究区的动态变化规律;尽管部分学者已对时空演变规律进行了研究,但仍缺乏对驱动因素的进一步探测,在一定程度上削弱了政策制订的时效性和可靠性。

《意见》是中国生态文明建设的第一个全面部署的纲领性文件,对其实施前后一段时期的对比研究无疑具有重要意义。河北省因其多样的地貌类型和特

殊的地理位置极具典型性,生态产品多样,生态地位十分突出^[18]。2021 年《河北省国土空间规划(2021—2035 年)》公示稿中提出“经济强省,美丽河北”的愿景,极力打造“两山、两翼、三带、多廊、多心”的生态空间格局,构筑京津冀生态安全屏障,表明河北省在未来较长时期内的发展重心之一就是加强生态环境建设,增强生态产品供给能力^[19]。考虑到河北省在京津冀生态安全中所处的独特地位^[20],以及在全类型、长时间跨度、县区级微观单元方面研究的迫切需求,本文在对 2010 年、2015 年、2020 年河北省 168 个县区单元 EPV 数值分析的基础上,深入探究其空间分布演变和聚类演变特征及其空间演变的主要驱动力来源,旨在为河北省及其他相关区域生态补偿、生态修复定价提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河北省位于 36°05′—42°40′N,113°27′—119°50′E,环抱京津,下辖张家口、承德、秦皇岛、保定、廊坊、唐山、石家庄、衡水、沧州、邢台、邯郸等 11 市 168 个县(市、区)(以下简称“县区”),陆域面积 $1.89 \times 10^5 \text{ km}^2$,海域面积 $7.20 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。地势西北高,东南低,由西北向东南倾斜,陆域最大海拔高度差近 2 900 m。河北省地貌类型多样,是全国唯一兼具山地、丘陵、高原、平原、盆地、湖泊和海滨的省份,其中河北平原占全省总面积的 43.4%,耕地广布,是中国北方重要的棉粮产区。燕山和太行山山地占全省总面积的 48.1%,森林、草地覆盖率高,生物多样性丰富。东部沿海和坝上高原地区湿地资源丰富。受温带大陆性季风气候影响,雨热同期,四季分明^[18]。在加快生态文明建设的背景下,河北省作为京津冀协同发展的重要一环,具有非常重要的生态地位和研究意义。

1.2 数据来源

生态价值当量数据来源于《河北统计年鉴 2021》《中国统计年鉴 2021》和河北省粮油市场监测预警系统(<http://lswz.hebei.gov.cn/index/>);土地利用面积数据由资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的 2010、2015、2020 年土地利用遥感监测解译数据处理得到,空间分辨率为 1 km;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>),分辨率为 90 m;气候数据来源于资源环境科学与数据中心和国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);社会和经济数据来源于《河北经济年鉴 2011》《河北经济年鉴 2016》《河北统计年鉴 2021》《中国城市统计年鉴 2011》

《中国城市统计年鉴 2016》《中国城市统计年鉴 2021》;气体数据来源于 NASA 旗下的 Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) 和 Center for Global Environmental Research (<https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/>);行政区划数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>)。

2 研究方法

2.1 生态产品价值评估

2.1.1 生态产品价值核算

(1) 当量因子表修正。谢高地等在 Costanza 评估模型的基础上,依据中国实际提出了中国生态服务价值当量因子法,其后依据调研资料和生物量数据对该方法进行了补充和修订^[21]。本文基于谢高地等提出的生态系统服务当量因子表^[22]进行生态产品价值核算,并结合河北省的实际生产能力,采用粮食修正方法^[23]对当量因子表进行研究区修正〔见式(1)和式(2)〕。2020 年河北省和全国的耕地单位面积粮食平均产量分别为 5.94 t/hm^2 , 5.73 t/hm^2 ,计算得到当量修订因子为 1.04,修正结果见表 1。

$$\sigma = \frac{Y_p}{Y} \quad (1)$$

$$E_{ij} = \sigma \times e_{ij} \quad (2)$$

式中: σ 为河北省修订因子; Y_p 和 Y 分别表示河北省和全国单位面积粮食平均产量; E_{ij} 表示第 i 类生态产品对应的第 j 类服务功能的当量因子; e_{ij} 表示谢高地等确定的同类生态产品对应的同类服务功能的当量因子,其中 $i=1,2 \dots 6$,分别代表耕地、林地……未利用地; $j=1,2 \dots 11$,分别代表食物生产、原料生产……美学景观。

(2) 1 个标准当量因子的经济价值修正。从河北省粮油市场监测预警系统获得 2020 年小麦和玉米的收购单价分别为 2.352 元/kg 和 2.340 元/kg。从《河北统计年鉴 2021》和《中国统计年鉴 2021》处获得单位面积产量和总播种面积数据。由 1 个标准当量因子的经济价值量等于平均粮食单产市场价值的 $1/7$ ^[24],计算可知河北省 1 个标准当量因子的经济价值(F)为 $1\ 776 \text{ 元/hm}^2$ 〔见式(3)〕。最终计算得到研究区的生态产品价值(EPV)〔见式(4)〕。

$$F = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{a_i p_i y_i}{T} \quad (3)$$

$$\text{EPV} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_i \times \text{VC}_{ij} \quad (4)$$

$$\text{VC}_{ij} = E_{ij} \times F \quad (5)$$

式中: F 为 1 hm^2 生态产品当量因子的经济价值(元/ hm^2); i 为研究区粮食作物的种类; n 为主要粮

食作物的总类别数; a_i 为第 i 种粮食作物播种的总面积; p_i 为第 i 种粮食作物单位面积平均产量; y_i 为第 i 种粮食作物的平均市场单价; T 为所有粮食

作物的总播种面积; EPV 表示河北省生态产品价值; A_i 表示第 i 类生态产品类型的面; VC_{ij} 表示第 i 类生态产品对应的第 j 类服务功能的价值系数。

表 1 河北省生态产品价值当量因子修正结果(2020)

Table 1 Corrected results of equivalent factors of ecological product values in Hebei Province (2020)

一级分类	二级分类	生态系统服务当量因子					
		耕地	林地	草地	水域	湿地	未利用地
供给服务	食物生产	0.88	0.30	0.10	0.83	0.53	0.01
	原料生产	0.42	0.69	0.15	0.24	0.52	0.03
	水资源供给	0.02	0.35	0.08	8.62	2.69	0.02
调节服务	气体调节	0.70	2.26	0.53	0.80	1.98	0.11
	气候调节	0.37	6.76	1.39	2.38	3.74	0.10
	净化环境	0.10	2.01	0.46	5.77	3.74	0.32
	水文调节	0.28	4.93	1.02	106.33	25.20	0.22
支持服务	土壤保持	1.07	2.76	0.64	0.97	2.40	0.14
	维持养分循环	0.12	0.21	0.05	0.07	0.19	0.01
	生物多样性	0.14	2.51	0.58	2.65	8.18	0.12
文化服务	美学景观	0.06	1.10	0.26	1.97	4.92	0.05

2.1.2 敏感性指数 生态产品价值系数(VC)的确定对于 EPV 核算的准确性相当关键。为确保核算的科学性和可靠性,引入敏感性指数(CS)检验 EPV 核算值对 VC 变动的弹性状态。当 $CS > 1$ 时,表明 EPV 对 VC 富有弹性,对 VC 的准确性要求高;当 $CS < 1$ 时,表明 EPV 对 VC 缺乏弹性,对 VC 的准确性要求低,此时 EPV 的可信度高。本文采取将 VC 上下调整 50% 的方式,计算不同生态产品类型的敏感性指数大小^[25],见式(6)。

$$CS = \left| \frac{(EPV_b - EPV_a) / EPV_a}{(VC_{bf} - VC_{af}) / VC_{af}} \right| \quad (6)$$

式中:CS 为敏感性指数; EPV_b 和 EPV_a 表示生态产品价值系数调整前后的生态产品价值; VC_a 和 VC_b 表示调整前后的生态产品价值系数; f 表示生态产品类型。

2.2 空间聚类特征分析

2.2.1 全局莫兰指数 为探究 EPV 的空间聚类特征,利用全局莫兰指数(global Moran's I)对河北省 EPV 进行全局空间自相关分析,判断其是否存在空间上的集聚分布以及集聚的程度[见式(7)]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (7)$$

式中: I 为全局 Moran's I 指数,取值为 $[-1, 1]$,当 $I > 0$ 时,表示 EPV 在空间上趋于集聚;当 $I < 0$ 时,表示 EPV 在空间上趋于分散;当 $I = 0$ 时,表示 EPV 在空间上随机分布。 n 表示研究单元总个数; Y_i 和 Y_j

分别表示区域 i 和 j 的 EPV 值; \bar{Y} 为 Y 的均值; S^2 为 Y 的方差; W_{ij} 是空间权重矩阵^[26]。在空间权重矩阵 W_{ij} 的选取上,考虑到河北省县区单元在空间上连片分布,本文选择 Queen 邻近性空间权重矩阵,即若两个县区存在共同的交点或边界,则空间权重矩阵的元素设为 1,否则为 0。

2.2.2 高/低聚类指数 全局莫兰指数可用于量测事物在空间上的集聚性,但不能判断研究对象在空间上是高值集聚还是低值集聚。引入高/低聚类指数(Getis-Ord General G)^[27],对存在的集聚分布做进一步属性值特点分析,见式(8):

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_i Y_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_i Y_j} \quad (8)$$

在空间不集聚的假设下, G 的期望值为:

$$E(G) = W_{ij} / [n(n-1)] \quad (9)$$

在正态分布的前提下, G 的统计检验值为:

$$Z(G) = [G - E(G)] / \sqrt{\text{var}(G)} \quad (10)$$

式中: G 为 Getis-Ord General G 指数; $E(G)$ 为 G 的期望值; $Z(G)$ 为 G 的统计检验值; $\text{var}(G)$ 为 G 的理论方差;其余符号所代表的含义与公式(7)中的符号含义一致。当 G 值高于 $E(G)$ 值时,且 Z 值显著时,表示 EPV 在空间上是高值集聚;当 G 值低于 $E(G)$ 值时,且 Z 值显著时,表示 EPV 在空间上是低值集聚;当 G 值趋于 $E(G)$ 值时,表示 EPV 在空间上是随机分布^[27]。

2.2.3 热点分析方法 考虑到全局 Moran's I 指数和高/低聚类指数的功能在于判断和描述,无法展现 EPV 高值或低值在空间上发生聚类的具体位置以及聚类的密集程度,进一步引入热点分析方法中的 Getis-Ord G_i^* 指数,以全面直观地呈现其聚类格局。根据不同置信水平将热点分析结果分为热点、次热点、次次热点、不显著、次次冷点、次冷点、冷点 7 个等级,见式(11):

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (11)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j / n \quad (12)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 / n - \bar{X}^2} \quad (13)$$

式中: G_i^* 为 Getis-Ord G^* 指数; x_j 是第 j 个研究单元的 EPV 值; \bar{X} 是所有研究单元的 EPV 均值; w_{ij} 是区域 i 和 j 之间的空间权重系数; n 是研究单元总个数^[28]。本文基于正态分布检验假设,选取显著性检验水平分别为 1%,5% 和 10%,对应临界值分别为 ± 2.58 , ± 1.96 和 ± 1.65 ,以此作为冷热点不同等级划分的标准。

2.3 影响因素地理探测

地理探测器是探测空间分异性并揭示其背后驱

动力的一组统计学方法^[29],它不仅可以识别影响因变量 Y 的主导因子和无效因子,还可测量出两不同因子交互影响的强度和方式。本文主要运用因子探测研究因变量 EPV 的空间分异性以及驱动因子 X 对因变量空间分异的解释贡献度,识别起主导作用的单因子;利用交互作用探测评估两不同因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量 EPV 的解释贡献度,以 q 值度量,见公式(14):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (14)$$

式中: h 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差;SSW, SST 分别为层内方差之和及全区总方差。 q 为其值域为 $[0, 1]$, q 值越大,表示 X 对 Y 的解释力越大^[29]。

利用交互作用探测评估两不同因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量 EPV 的解释贡献度,最终识别交互影响最强的因子组合。

3 结果与分析

3.1 河北省生态产品价值评估结果与分析

3.1.1 生态产品价值量分析 根据生态产品类型对土地利用遥感监测解译数据进行重分类,获取生态产品面积数据,并结合公式(4)计算得到河北省不同时期各类型生态产品价值及其变化量和变化率情况(见表 2)。

表 2 河北省生态产品价值(EPV)及其变化情况

Table 2 Ecological product values (EPV) and its changes in Hebei Province

生态产品类型	2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年		2015—2020 年		2010—2020 年	
	EPV/10 ⁸ 元	EPV/10 ⁸ 元	EPV/10 ⁸ 元	变化量/10 ⁸ 元	变化率/%	变化量/10 ⁸ 元	变化率/%	变化量/10 ⁸ 元	变化率/%
耕地	838.31	834.80	781.20	-3.52	-0.004	-53.60	-0.064	-57.12	-0.068
林地	1 820.81	1 819.82	1 853.91	-0.99	-0.001	34.09	0.019	33.10	0.018
草地	365.09	364.86	354.87	-0.23	-0.001	-9.99	-0.027	-10.22	-0.028
水域	528.83	538.60	1035.70	9.76	0.018	497.10	0.923	506.87	0.958
湿地	332.67	329.86	228.56	-2.81	-0.008	-101.31	-0.307	-104.11	-0.313
未利用地	1.96	1.96	0.77	0.00	0.000	-1.19	-0.606	-1.19	-0.606
总计	3 887.68	3 889.90	4 255.01	2.22	0.001	365.11	0.094	367.33	0.094

研究期河北省生态产品总价值均超过了 3.80×10^{11} 元,呈先平稳后快速上升的趋势,到 2020 年突破 4.20×10^{11} 元,整体上大幅提高,涨幅接近 10%。从各类型生态产品价值的情况看,林地 EPV 最高,在 EPV 中所占比例最大,其次是耕地、水域,再次是草地、湿地和未利用地。这样的结果很大程度受到各自土地利用面积和价值系数大小的影响。从变化量和变化

率来看,2010—2015 年水域 EPV 变化量和变化率均为最大,其他产品类型变化均很小,并且水域为正向变化,其余均为负向或未发生变化。这与公众保水节水意识的提高和政府水治理效率的提高有着密切关系,同时表明人口的扩张、生活水平的提高以及经济活动的加剧,给耕地、林地、草地、湿地都带来了一定的服务供给压力。2015—2020 年,各类型 EPV 变动

均较剧烈,其中水域变化量和变化率仍为最大,但正向变化的幅度远大于第一阶段。另外林地出现正向变化,其余类型仍为负向变化,其幅度也远大于第一阶段,负向变化量最大的是湿地,负向变化率最大的是未利用地。以上结果表明水域提供的 EPV 持续大幅增加,近年来水生态文明建设成效显著,林地保护开发也得到有效促进,而耕地、草地、湿地情况并未得到合理改善,甚至有进一步加剧的风险。另外,湿地本身的重要性导致单位面积价值系数高,同样的面积变化会导致更大的变化量,这也提醒全社会要更加重视对湿地的保护利用。

3.1.2 核算结果敏感性分析 借助式(6)测得敏感性指数(见表 3)。各生态产品类型的 CS 均小于 1,表明核算结果均具有可靠性。其中,CS 最高的是林地,总体保持稳定,EPV 对 VC 精确性的依赖程度依旧在可信范围内;其次是耕地、水域、草地、湿地,除水域整体呈上升趋势,依赖程度有所提高外,其余均呈下降趋势,降幅明显。在此变化过程中,4 类生态产品的 CS 次序由最初的耕地—水域—草地—湿地最终稳定为水

域—耕地—草地—湿地;最低的未利用地在 0.000 2~0.000 5 之间,EPV 对 VC 的依赖程度微乎其微。

表 3 河北省生态敏感性分析

Table 3 Ecological sensitivity analysis in Hebei Province

生态产品类型	敏感性指数 CS		
	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	0.215 6	0.214 6	0.183 6
林地	0.468 4	0.467 8	0.435 7
草地	0.093 9	0.093 8	0.083 4
水域	0.136 0	0.138 5	0.243 4
湿地	0.085 6	0.084 8	0.053 7
未利用地	0.000 5	0.000 5	0.000 2

注:各生态产品类型在价值系数 VC 上下调整 50% 时的敏感性指数。

3.2 空间演变特征

3.2.1 空间分布演变特征 为对比研究《意见》实施前后 5 a EPV 的空间演变特征,采用自然断点法对三期单位面积 EPV 数据进行等级划分(见图 1)。

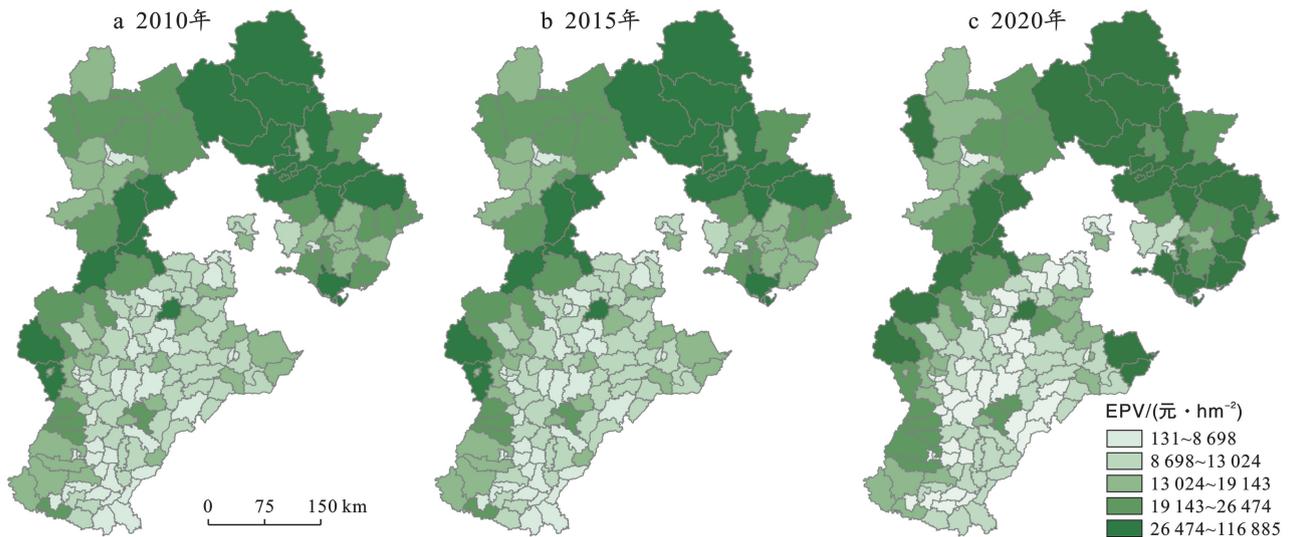


图 1 河北省单位面积生态产品价值(EPV)分布

Fig.1 Distribution of ecological product values (EPV) per unit area in Hebei Province

2010 年河北省 EPV 空间分布呈现出北高南低,西高东低的特点,高值主要分布于北部的燕山、坝上高原地区和西部的太行山地区,次高值主要分布于以上区域的外围绵延地带,低值集中分布于东南部广袤的河北平原地区。2015 年的空间变化并不明显,总体保持平稳。2020 年发生了显著变化,其中东部沿海县区 EPV 增长明显;西部临山县区也出现整体增长,这与水域资源开发保护和林业资源养育维护有很大关系;东南部平原县区以低值单元与次低值单元间的相互转化为主,呈现低值与次低值单元交错相间分

布的格局,侧面展现平原县区的不同耕地保护力度,因此出现 EPV 小幅增减变化。

3.2.2 空间聚类演变特征 应用全局莫兰指数对单位面积 EPV 在空间上的集聚性及其集聚程度进行显著性检验,并采用高/低聚类指数分析其存在低值集聚或高值集聚(见表 4)。研究期河北省单位面积 EPV 在空间上均具有显著集聚性,并且表现为显著高值集聚;从 Z 得分来看这种集聚状态存在一定程度的减弱,但短时期内并不会发生向离散分布或随机分布的质变。

表 4 河北省单位面积生态产品价值空间自相关与聚类属性检验

Table 4 Test of spatial autocorrelation and cluster attributes of ecological product values per unit area in Hebei Province

年份	空间自相关				高/低聚类			
	<i>I</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	模式	<i>G</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	模式
2010	0.680	14.476	0.000	集聚	0.019	14.201	0.000	高值集聚
2015	0.679	14.451	0.000	集聚	0.019	14.177	0.000	高值集聚
2020	0.615	12.957	0.000	集聚	0.017	12.558	0.000	高值集聚

引入热点分析方法分析和呈现 EPV 高低值聚类的具体位置和范围,结果见图 2。

2010 年和 2015 年热点分布均呈现出北高南低,西高东低的分布格局,与单位面积 EPV 空间分布呈现出相似规律;冷点分布整体较零散,但局部较集中,主要分布于平乡县—曲周县—邱县—广平县—馆陶县、长安区—裕华区—藁城区以及竞秀区—莲池区—蠡县—饶阳县三大组团。2020 年冷热点分布发生明显变化,不同置信水平下的热点范围整体上大面积消失,其中西部太行山地区的热点、次热点均消失,北部的燕山、坝上高原地区热点范围也大面积消失,进而

转化为次热点、次次热点。另外在东部的沧州市和唐山市出现黄骅市—海兴县—孟村回族自治县—盐山县和丰南区—曹妃甸区—滦南县—乐亭县两个新的热点组。以上表明,原本的高值集聚区域 EPV 变化剧烈,导致高值集聚密集程度大幅下降。临海县区的 EPV 普遍大幅提高,致使新的热点组团在沿海地区出现。不同置信水平下的冷点范围也大面积消失,三大冷点组团不复存在,仅剩安平县、晋州市、赵县、广平县 4 个次次冷点县区,低值集聚的密集程度也在大幅下降。这表明河北平原 EPV 低值县区在耕地保护开发方面取得显著成效。

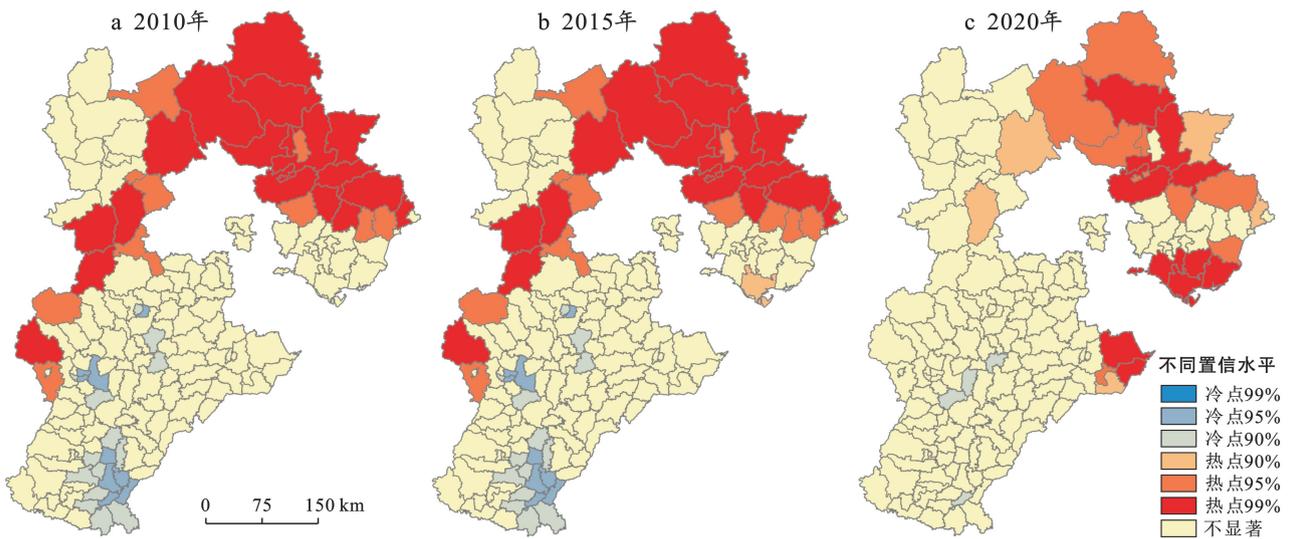


图 2 河北省单位面积生态产品价值冷热点分布

Fig.2 Distribution of hot and cold spots of ecological product values per unit area in Hebei Province

3.3 空间演变驱动力分析

3.3.1 驱动因子指标体系构建 借助地理探测器探究单位面积 EPV 空间演变的驱动力,首先要合理构建驱动因子指标体系。驱动因子受人为主观因素以及自身性质的不同,大致可分为自然因素、经济因素、社会因素、生态因素 4 个一级类。结合徐勇等^[30]、耿甜伟等^[31]、韩美等^[32]已有研究成果,兼顾因子的典型性、科学性和相关性,本文选取与生态产品面积直接或间接紧密联系的 18 个二级类驱动因子构建指标体系(见表 5)。

3.3.2 驱动因子影响力探测 在地理探测器中, q 统

计值用来表示驱动因子对因变量空间分异的解释贡献度大小。除坡向(X_3)外,所有驱动因子均通过 0.05 的显著性水平检验,基于因子探测结果对除坡向外的其他因子进行分析,结果见图 3。

2010—2020 年驱动因子对河北省 EPV 空间分异的解释贡献度均发生显著变化,2010 年解释贡献度较大的因子($q > 0.40$)依次为:人均 GDP(X_6 , 0.61),CO 表面浓度(X_{14} , 0.60), O_3 浓度(X_{15} , 0.57),年均气温(X_5 , 0.55),人均绿地面积(X_{13} , 0.41); 2015 年解释贡献度较大的因子($q > 0.40$)为年均气温(X_5 , 0.59),CO 表面浓度(X_{14} , 0.57),高程(X_1 ,

0.53), NO_2 表面浓度(X_{17} , 0.49), O_3 浓度(X_{15} , 0.47), 土地城镇化率(X_{11} , 0.45), 人口密度(X_{10} , 0.43), 坡度(X_2 , 0.43); 2020 年解释贡献度较大的因子($q > 0.40$) 为 人均 GDP(X_6 , 0.48), CO 表面浓度(X_{14} , 0.48), 年均气温(X_5 , 0.44), O_3 浓度(X_{15} , 0.43)。综合来看, 研究期 CO 表面浓度(X_{14}), O_3 浓度(X_{15}), 年均气温

(X_5)的 q 值均位于前列, 是影响河北省 EPV 空间演变的主导因子; 人均 GDP(X_6)的 q 值在 2010 年和 2020 年均位列第一, 而 2015 年仅为 0.19, 未起到主导作用, 说明其在特定年份的解释力强大, 但持续性不足, 很大程度受到了经济由高速增长向中高速增长转型的影响。

表 5 河北省单位面积生态产品价值(EPV)空间分异驱动因子指标体系

Table 5 Index system of driving factors for spatial differentiation of ecological product values (EPV) per unit area in Hebei Province

影响因素	驱动因子	单位	编码	影响因素	驱动因子	单位	编码
自然因素	高程	m	X_1	社会因素	人口密度	人/ km^2	X_{10}
	坡度	%	X_2		土地城镇化率	%	X_{11}
	坡向	($^\circ$)	X_3		人均播种面积	$\text{hm}^2/\text{人}$	X_{12}
	年降水量	mm	X_4		人均绿地面积	$\text{m}^2/\text{人}$	X_{13}
		年均气温	$^\circ\text{C}$	X_5	生态因素	CO 表面浓度	mol/cm^2
经济因素	人均 GDP	元/人	X_6	O_3 浓度		DU	X_{15}
	第一产业产值/GDP	%	X_7	SO_2 浓度		DU	X_{16}
	第二产业产值/GDP	%	X_8	NO_2 表面浓度		mol/cm^2	X_{17}
	社会消费品零售总额	10^{11} 元	X_9	CO_2 排放量		t/km^2	X_{18}

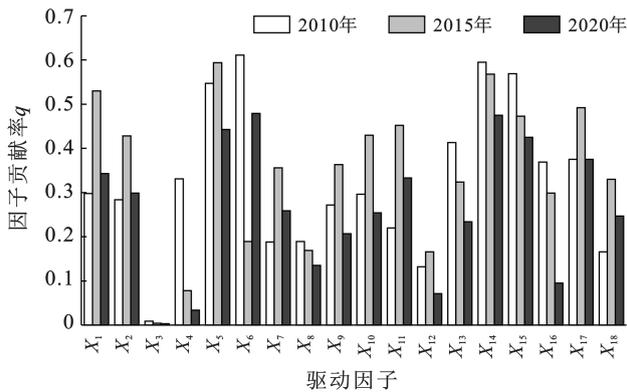


图 3 河北省单位面积生态产品价值空间分异驱动因子贡献率(q)

Fig.3 Contribution rate (q) of driving factors for spatial differentiation of ecological product values per unit area in Hebei Province

①在自然因素中, 高程(X_1)、坡度(X_2)、年均气温(X_5)的 q 值均先增后减, 只有年降水量(X_4)的 q 值呈急速下降趋势, 各影响因子的解释贡献度整体增减趋势并不一致; ②在经济因素中, 人均 GDP(X_6)、第二产业产值/GDP(X_8)、社会消费品零售总额(X_9)的 q 值从 2010 年的 0.61, 0.19, 0.27 下降至 2020 年的 0.48, 0.14, 0.21, 说明这 3 个经济因子的解释力在逐渐减弱, 而第一产业产值/GDP(X_7)的 q 值从 0.19 提高至 0.26, 解释力在不断提高; ③在社会因素中, 人口密度(X_{10})、人均播种面积(X_{12})、人均绿地面积(X_{13})的 q 值从 2010 年的 0.30, 0.13, 0.41 下降至 2020 年的 0.25, 0.07, 0.23, 说明这 3 个社会因子的解释力在逐渐减弱, 只有土地城镇化率(X_{11})的解释力

在提高; ④生态因素中, CO_2 排放量(X_{18})的 q 值从 2010 年的 0.17 提高至 2020 年的 0.25, 解释力在不断提高, NO_2 表面浓度(X_{17})的 q 值在研究期间基本未变, 而 CO 表面浓度(X_{14})、 O_3 浓度(X_{15})、 SO_2 浓度(X_{16})的 q 值由 2010 年的 0.60, 0.57, 0.37 下降至 2020 年的 0.48, 0.43, 0.10, 说明这 3 个因子的解释力在逐渐减弱。总体来看, 内部各因子存在的解释力趋向与强弱差异在自然、经济、社会、生态等因素中均有体现。

基于以上探测结果可知, 从驱动因子的角度来看, 各因子确有主导和非主导之分, 但从影响因素的角度看, 很难对由有限的驱动因子所组成的影响因素进行主次作用的明确划分; 另外, 从时间尺度看, 影响因素的内部因子存在着趋势不一, 力度不同的驱动作用。因此, 从微观个体的视角去具体剖析 EPV 空间演变的驱动力来源, 分析结果更具参考价值 and 可执行性。

3.3.3 驱动因子交互作用探测 交互作用探测进一步从驱动因子个体间的相互影响出发, 探究双因子交互对因变量的解释力大小(见图 4)。研究期驱动因子交互作用 q 值均大于单因子作用 q 值, 双因子普遍比单因子具有更强的解释力, 且均呈现为双因子增强或非线性增强。其中 2010 年双因子增强交互组合占比高达 81%, 非线性增强仅占 19%。随着时间推移, 非线性增强趋势逐渐明显, 到 2020 年其占比达到 35%, 表明驱动因子的交互作用规律愈加复杂和多样。2010 年交互作用最强的是人均 GDP \cap NO_2 表面浓度, q 值高达 0.71, 因此, 该因子组合成为影响河北省 EPV 空间分异的主要驱动因素; 而在 2015 年和

2020 年,交互作用最强的因子组合转变为高程 \cap O_3 浓度和人均 GDP \cap CO 表面浓度, q 值分别为 0.73, 0.66, 主要驱动因素也随之发生变化。由此可知,研

究期生态因子在交互作用中均扮演了主要角色,其与经济因子和自然因子的交互作用成为影响河北省单位面积 EPV 空间演变的主要驱动力。

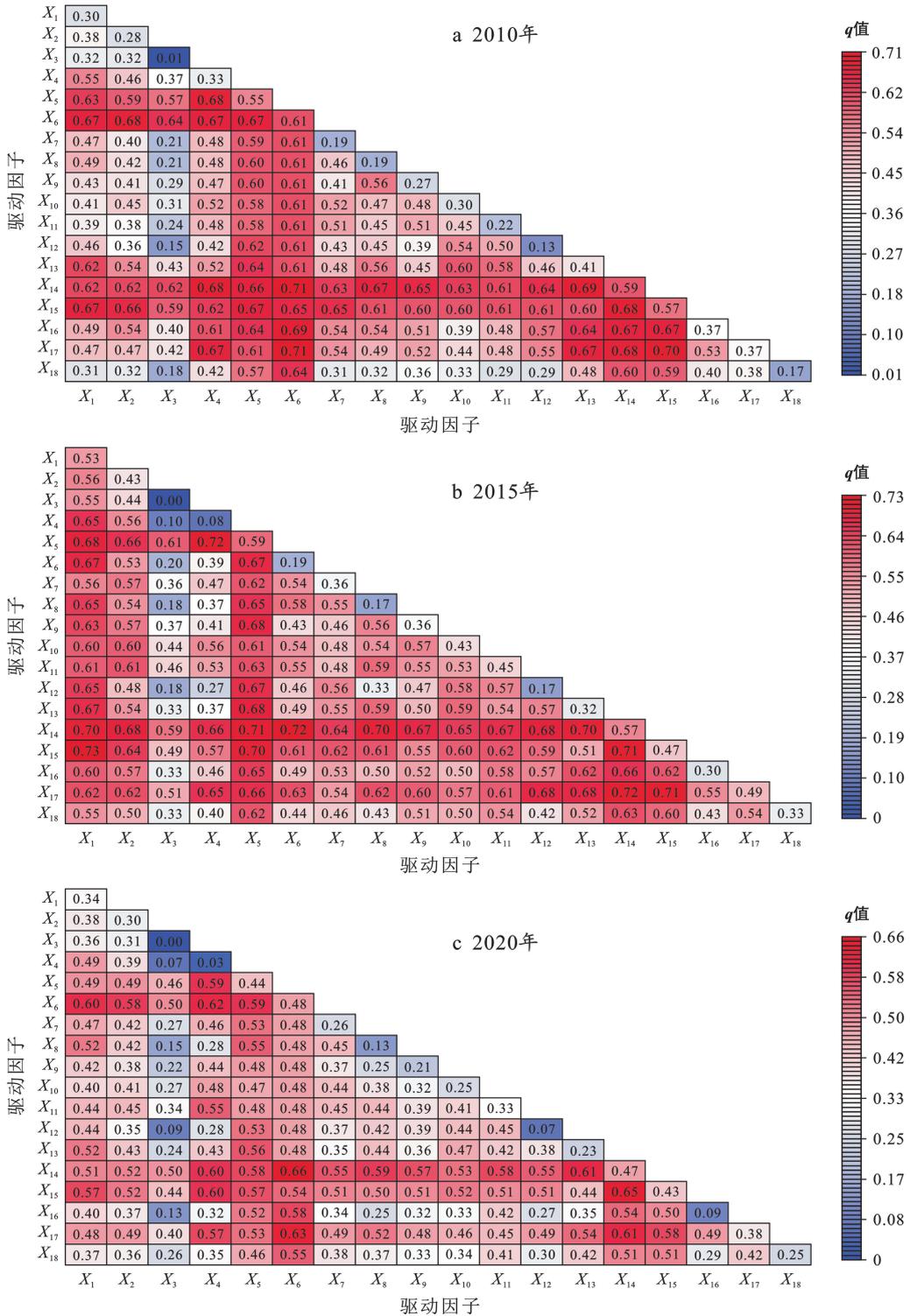


图 4 河北省单位面积生态产品价值空间分异驱动因子交互作用(2010—2020)

Fig.4 Interaction of driving factors for spatial differentiation of ecological product values per unit area in Hebei Province (2010—2020)

4 讨论

通过以上研究,可以直观对比《意见》^[5]实施前后

河北省生态产品价值演变的区域差异性。本研究结果不仅可为政府主管部门制定生态补偿和生态修复政策提供科学依据,还可为各县区单元构筑更坚固的

京津冀生态安全屏障提供相关建议。与王彦芳等^[33]、李聪聪^[34]、王盛等^[18]相关研究结果相比,本文以 2020 年为核算基期,一个标准当量因子的经济价值受粮食单产和价格上升影响略高于往期,使得核算结果略高于已有研究。总体来看,河北省 EPV 得到显著提高,但从各生态产品类型来看,只有水域和林地正向提高,其余类型仍在继续减少。EPV 提高并未在所有类型中同步发生。因此,以耕地、草地、湿地为主要生态产品类型的县区,既要看到整体生态文明建设的成效,也应针对特定生态产品类型做出更大努力,谨防其进一步退化的风险,从而拥有更长效和多元的提高动力;此外,2020 年热点分布发生明显变化,原本的热点、次热点区域在西部的太行山地区消失,北部的燕山、坝上高原地区热点范围也部分转化为次热点,而在东部沿海县区则出现两个新的热点组团。作为林地和水域资源丰富的山地高原县区应对此足够重视。既要掌握林地和水域的省域整体提高,也要意识到各县区单元间升降的不均衡性。另外,沿海县区在继续水生态文明建设的同时,也应加大其他领域的生态文明建设,争取省域整体、各县区单元、全类型生态产品价值的协调提高。

本研究选取的 5 类常见生态因素中的 CO₂ 作为一种温室气体,通过对气温、降水、植物生长的影响,起到了间接提高或抑制各类型 EPV 的效果,成为生态因素中一个极其重要的因子。限于 2020 年 CO₂ 排放数据的滞后性,为全面探究其空间演变的驱动力,采用 2019 年数据进行替代的方式,使研究结果客观上存在一定偏差。然而,由于国内经济运行的稳定性和政策的连续性,CO₂ 排放数据并不会发生剧烈浮动,对研究结果的影响在合理范畴,对县区单元和分类型 EPV 提高的策略建议仍具有较强的时效性和可行性。本研究还有值得改进之处。如在大尺度生态价值评估方面,当量因子法具有数据要求少,易操作,可比较的优势,但研究结果仅代表研究区的平均情况,并未考虑到更微观尺度的差异性。后续将进一步研究时空因子对生态产品价值的动态调节作用,使核算结果更加贴合地方实际。另外,不同的研究单元划定方式会使研究结果的空间分布产生偏移,从而对生态资源本底的区位把握。因此,生态产品价值的尺度效应应作为后期进一步研究的重点。

5 结论

本文基于当量因子法核算河北省 168 个县区 EPV 并对其变化幅度进行分析,同时借助敏感性指数检验核算值的可靠性,在此基础上通过分析其空间

分布演变和聚类演变特征来探究空间演变特征,进而通过地理探测器对空间演变驱动因子进行探测,得出的主要如下结论。

(1) 从核算结果看。研究期河北省 EPV 均超过了 3.80×10^{11} 元,呈先平稳后快速上升的趋势,到 2020 年突破 4.20×10^{11} 元,整体上大幅提高,涨幅接近 10%。其中林地最高,所占比例最大。2010—2015 年水域变化量和变化率最大,且为正向变化,其余均为负向或未发生变化,各类生态产品价值变动整体平稳。2015—2020 年整体变动剧烈,水域变化量和变化率仍为最大,但正向变化幅度远超前期。

(2) 从空间演变特征看。2010 年和 2015 年河北省空间分布呈现出北高南低,西高东低的特点,高值集中于北部的燕山、坝上高原地区和西部的太行山地区,低值集中于东南部的河北平原地区,但 2020 年发生显著变化,东部沿海县区增长明显,西部临山区区整体增长。河北省 EPV 表现为空间上的显著高值集聚模式。2010 年和 2015 年热点分布同样呈现出北高南低,西高东低的特点,冷点分布整体较零散,局部较集中,但 2020 年发生明显变化,不同置信水平下的冷热点范围均大面积消退,热点分布呈现出北高南低,东高西低的特点,冷点分布基本消失。

(3) 从驱动因子探测结果看。CO 表面浓度、O₃ 浓度、年均气温对空间演变具有更持久和强大的解释力,人均 GDP 的解释力虽连续性不够,但对特定年份仍具有较强的解释力,社会因子则相对最弱;无论是自然、经济、社会还是生态因素,其内部因子均存在着趋势不一,力度不同的驱动作用,应从具体驱动因子而非整体影响因素的角度去更深入地剖析和界定其主次作用。双因子交互作用普遍比单因子具有更强的解释力,人均 GDP \cap NO₂ 表面浓度、高程 \cap O₃ 浓度和人均 GDP \cap CO 表面浓度等三期起主导作用的组合因子成为影响河北省 EPV 空间演变的主要驱动力。

[参 考 文 献]

- [1] 廖福霖.生态产品价值实现[J].绿色中国,2017(13):50-53.
Liao Fulin. The realization of ecological product value [J]. Green China, 2017(13):50-53.
- [2] 李芬,张林波,舒俭民,等.三江源区生态产品价值核算[J].科技导报,2017,35(6):120-124.
Li Fen, Zhang Linbo, Shu Jianmin, et al. Accounting system for products in the ecosystem of the Three-River headwater area [J]. Science & Technology Review, 2017,35(6):120-124.

- [3] 吴昌华,崔丹丹.千年生态系统评估[J].世界环境,2005(3):56-65.
Wu Changhua, Cui Dandan. The millennium ecosystem assessment [J]. World Environment, 2005(3):56-65.
- [4] 黄如良.生态产品价值评估问题探讨[J].中国人口·资源与环境,2015,25(3):26-33.
Huang Ruliang. Study on the ecological product value assessment [J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(3):26-33.
- [5] 杨继文.中国环境治理的两种模式:政策协调与制度优化[J].重庆大学学报(社会科学版),2018,24(05):108-116.
Yang Jiwen. On two modes of environmental governance in China: Policy coordination and system optimization [J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition), 2018(5):108-116.
- [6] 张丽佳,周妍.建立健全生态产品价值实现机制的路径探索[J].生态学报,2021,41(19):7893-7899.
Zhang Lijia, Zhou Yan. Exploration on the path of establishing and improving the value realization mechanism of ecological products [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7893-7899.
- [7] 高晓龙,林亦晴,徐卫华,等.生态产品价值实现研究进展[J].生态学报,2020,40(1):24-33.
Gao Xiaolong, Lin Yiqing, Xu Weihua, et al. Research progress on the value realization of ecological products [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(1):24-33.
- [8] Salzman J, Bennett G, Carroll N, et al. The global status and trends of payments for ecosystem services [J]. Nature Sustainability, 2018,1(3):136-144.
- [9] 於方,杨威杉,马国霞,等.生态价值核算的国内外最新进展与展望[J].环境保护,2020,48(14):18-24.
Yu Fang, Yang Weishan, Ma Guoxia, et al. The latest development and prospect of ecological value accounting at home and abroad [J]. Environmental Protection, 2020,48(14):18-24.
- [10] 刘江宜,牟德刚.生态产品价值及实现机制研究进展[J].生态经济,2020,36(10):207-212.
Liu Jiangyi, Mou Degang. Research progress of ecological product value and its realization mechanism [J]. Ecological Economy, 2020,36(10):207-212.
- [11] Wang Yongyang, Liu Gengyuan, Cai Yanpeng, et al. The ecological value of typical agricultural products: An emergy-based life-cycle assessment framework [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022,10:824275.
- [12] 赵志刚,余德,韩成云,等.鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J].生态学报,2017,37(24):8411-8421.
Zhao Zhigang, Yu De, Han Chengyun, et al. Ecosystem services value prediction and driving forces in the Poyang Lake Eco-economic Zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(24):8411-8421.
- [13] 李子,张艳芳.基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185.
Li Zi, Zhang Yanfang. Spatiotemporal evolution of ecosystem services in the main and tributaries of Weihe River basin based on InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):178-185.
- [14] Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, et al. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services [J]. Nature Communications, 2018,9:4839.
- [15] Wang Chao, Wang Xiaobo, Liu Dongwei, et al. Aridity threshold in controlling ecosystem nitrogen cycling in arid and semi-arid grasslands [J]. Nature Communications, 2014,5:4799.
- [16] Qiu Jiangxiao, Zipper S C, Motew M, et al. Nonlinear groundwater influence on biophysical indicators of ecosystem services [J]. Nature Sustainability, 2019,2(6):475-483.
- [17] Duan Kai, Sun Ge, Sun Shanlei, et al. Divergence of ecosystem services in U.S. National Forests and Grasslands under a changing climate [J]. Scientific Reports, 2016,6:24441.
- [18] 王盛,李文静.河北省生态系统服务价值时空变化格局分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2020,38(2):225-232.
Wang Sheng, Li Wenjing. Spatio-temporal variation of ecosystem service value in Hebei Province [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2020,38(2):225-232.
- [19] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(1):80-88.
Wang Xiaomeng, Pan Peipei, Wang Xiaoxu, et al. Research on ecosystem service trade-off/synergy relationship in Hebei Province based on land use [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(1):80-88.
- [20] 张蓬涛,刘双嘉,周智,等.京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变[J].生态学报,2021,41(9):3354-3367.
Zhang Pengtao, Liu Shuangjia, Zhou Zhi, et al. Supply and demand measurement and spatio-temporal evolution of ecosystem services in Beijing Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(9):3354-3367.
- [21] 张杰,李清泉,吴祥茵,等.基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析[J].生态学报,2021,41(21):8375-8386.
Zhang Jie, Li Qingquan, Wu Xiangjun, et al. Evolution

- of the ecosystem services value and carrying capacity in the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area based on land use changes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(21):8375-8386.
- [22] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].*自然资源学报*,2008,23(5):911-919.
Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008,23(5):911-919.
- [23] 丁梦婷,裴凤松,胡引翠,等.基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究[J].*生态学报*,2020,40(19):6801-6811.
Ding Mengting, Pei Fengsong, Hu Yincui, et al. Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Jiangsu Province based on LUCC [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(19):6801-6811.
- [24] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].*自然资源学报*,2003,18(2):189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003(2):189-196.
- [25] 王磊,薛雅君,张宇.基于土地利用变化的天津市生态资产价值评估及灰色预测[J].*资源开发与市场*,2017,33(7):796-801.
Wang Lei, Xue Yajun, Zhang Yu. Ecological assets valuation and grey forecast based on land use change in Tianjin City [J]. *Resource Development & Market*, 2017,33(7):796-801.
- [26] 韩增林,曹锡顶,狄乾斌.基础设施投入效率时空演变及其关联格局研究:基于中国地级以上城市的实证[J].*地理科学*,2021,41(6):941-950.
Han Zenglin, Cao Xiding, Di Qianbin. Spatial-temporal evolution of infrastructure investment efficiency and its correlation pattern based on the empirical study of prefecture-level cities in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021,41(6):941-950.
- [27] 郭津津,樊守彬,王军玲,等.北京市机动车排放的空间聚类特征研究[J].*环境科学与技术*,2017,40(1):141-146.
Guo Jinjin, Fan Shoubin, Wang Junling, et al. Spatial distribution cluster characteristics of vehicle emissions in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,40(1):141-146.
- [28] 姚婧,杨丽君,肖宇婷,等.基于社会—经济因子修正的沱江流域农业面源总磷污染负荷时空演变研究[J].*农业环境科学学报*,2022,41(5):1022-1035.
Yao Jing, Yang Lijun, Xiao Yuting, et al. Spatial-temporal evolution of agricultural non-point sources of total phosphorus pollution loads in Tuojiang River watershed based on correction of social-economic factors [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2022,41(5):1022-1035.
- [29] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [30] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J].*环境科学*,2022,43(7):3730-3740.
Xu Yong, Zheng Zhiwei, Guo Zhendong, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(7):3730-3740.
- [31] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].*自然资源学报*,2020,35(7):1714-1727.
Geng Tianwei, Chen Hai, Zhang Hang, et al. Spatio-temporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(7):1714-1727.
- [32] 韩美,孔祥伦,李云龙,等.黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制[J].*地理科学*,2021,41(6):1009-1018.
Han Mei, Kong Xianglun, Li Yunlong, et al. Eco-environmental effects and its spatial heterogeneity of ‘ecological-production-living’ land use transformation in the Yellow River delta [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021,41(6):1009-1018.
- [33] 王彦芳,刘敏,郭英,等.河北省生态环境支撑区生态系统服务价值评估[J].*水土保持通报*,2019,39(2):309-316.
Wang Yanfang, Liu Min, Guo Ying, et al. Estimation on ecosystem service value in ecological environment support areas of Hebei Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(2):309-316.
- [34] 李聪聪.河北省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[D].保定:河北大学,2019.
Li Congcong. Study on the influence of land use change on ecosystem service value in Hebei Province [D]. Hebei University, 2019.