

# 银川市生态经济可持续发展研究

商庆凯<sup>1</sup>, 阴柯欣<sup>1</sup>, 樊新刚<sup>2,3</sup>, 米文宝<sup>1,4</sup>

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 西部发展研究中心, 宁夏 银川 750021;

3. 宁夏大学 经济管理学院, 宁夏 银川 750021;

4. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 生态足迹模型是评价区域可持续发展水平和能力的科学方法之一, 为制定区域可持续发展政策提供了重要科技支撑。文章基于改进生态足迹方法, 在生态经济系统框架下构建生态足迹变化驱动力指标体系, 运用地理探测器分析了银川市 2009—2017 年生态经济发展状况。结果显示: 银川市人均生态足迹总体呈增长趋势, 人均生态承载力持续下降, 生态赤字较高, 生态压力较大; 生态足迹分布趋向失衡, 生态经济系统稳定性降低, 但区域可持续发展能力指数稳步增长; 经济系统对银川市生态足迹变化起主导作用, 总体表现为“经济子系统 > 生态子系统 > 技术子系统”。应从生态、经济、技术三方面采取措施提升银川市生态经济系统可持续发展能力。

**关键词:** 生态足迹; 生态经济系统; 地理探测器; 影响因素; 银川

**中图分类号:** F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2021)05-086-06

## Research on the Sustainable Development of Ecological Economy in Yinchuan

SHANG Qingkai<sup>1</sup>, YIN Kexin<sup>1</sup>, FAN Xingang<sup>2,3</sup>, MI Wenbao<sup>1,4</sup>

(1. School of Resource and Environment, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China;

2. Research Center for Western Development, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China;

3. School of Economics and Management, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China;

4. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-Western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China)

**Abstract:** Ecological footprint model is one of the scientific methods to evaluate the level and capacity of regional sustainable development, which provides important scientific and technological support for the formulation of regional sustainable development policies. This paper uses the improved ecological footprint method to construct the driving force index system of ecological footprint change under the framework of the ecological economic system, and uses the geographical detector to conduct a quantitative study on the ecological economic development of Yinchuan in 2009-2017. The results show that: The per capita ecological footprint of Yinchuan city is on the increase trend, the per capita ecological carrying capacity continues to decline, the ecological deficit is high, and the ecological pressure is large; The distribution of ecological footprint tends to be unbalanced, the stability of ecological economic system decreases, but the regional sustainable development capacity index increases steadily; The economic system plays a leading role in the change of ecological footprint of Yinchuan city, The overall performance is “economic subsystem > ecological subsystem > technological subsystem”. We should promote the sustainable development of ecological economy from the ecological, economic and technological aspects of Yinchuan city.

**Key words:** ecological footprint; eco-economic system; geodetector; influence factor; Yinchuan

快速工业化和城镇化使得更多的人走进现代生活, 在加速人类文明进程的同时也对资源环境和生态系统形成极大压力。21 世纪以来, 随着以气候变化为代表的全球资源环境问题日益凸显, 如何实现可持续发展引起了更多人的高度关注。学术界层面, 在 20 世纪可持

续发展问题提出后, 经过几十年的发展, 初步形成了一个专门学科——可持续性科学<sup>[1]</sup>。科学定量地评价人类活动对区域资源环境和生态系统的影响, 是实现可持续性发展面临的重要议题。生态足迹是生态经济学家里斯 (Ress) 等提出的用来衡量人类活动对自然资源的利用强

基金项目: 国家自然科学基金项目“宁夏限制开发生态区可持续经济社会规模的热力学多方法集成研究”(41761116)

第一作者简介: 商庆凯, 硕士研究生, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: gy20110709@163.com

通讯作者简介: 米文宝, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为生态学、区域地理与可持续发展。E-mail: miwbao@nxu.edu.cn

度和自然环境为人类生存提供服务的方法<sup>[2]</sup>，该方法通过将人类的物质、能源消费以及自然可以供给的服务性土地转换成具有统一衡量标准的生物生产性土地面积，以供需是否平衡来评价区域发展强度的适宜性。《科学》杂志曾刊文把生态足迹列为全球生物多样性描述的关键指标<sup>[3]</sup>。徐中民等<sup>[4]</sup>较早地将生态足迹引入国内学界，并以甘肃省为例进行了实证研究<sup>[5]</sup>。国内外学者在研究中不断改进生态足迹计算方法，开展了大量实证研究。从研究内容看，主要涉及生态安全<sup>[6-7]</sup>、土地利用<sup>[8-10]</sup>、资源利用<sup>[11-12]</sup>和城镇发展<sup>[13-14]</sup>等方面；从研究尺度看，既有全球<sup>[15]</sup>、国家<sup>[16]</sup>和地区<sup>[17]</sup>等宏观尺度，有省级<sup>[18]</sup>、市级<sup>[19]</sup>和县级<sup>[20]</sup>等中观尺度，也有乡镇<sup>[21]</sup>、高校<sup>[22]</sup>等微观尺度。近年来，与其他方法结合开展研究已成为趋势，主要是与其他足迹构成足迹家族<sup>[23]</sup>、与能值等热力学方法结合<sup>[24]</sup>、构建指标体系探究其影响因素<sup>[19]</sup>等。生态足迹研究为制定区域可持续发展政策提供了重要科技支撑。

银川市作为西北地区新兴重要综合性工业城市，是新的国家战略——“黄河流域生态保护和高质量发展”区域核心城市之一。尽管国内有关可持续发展的研究众多，但是对银川市关注较少，基于生态足迹方法开展综合性研究则更是鲜有，这与银川市在区域发展中所处的重要地位是不相符的。本文基于改进生态足迹方法，并借助地理探测器对银川市2009—2017年生态足迹变化及其影响因素进行综合研究，以期对银川市更好实施“黄河生态经济带”建设，实现新时代全面、协调、可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况

银川市地处西北内陆地区，是宁夏回族自治区首府，是全区政治、经济、文化、教育和交通中心，也是西北地区重要的中心城市之一。银川市是“宁夏沿黄经济区域中心城市”“宁夏内陆开放型经济试验区”核心地带和“丝绸之路经济带”重要节点城市。全市下辖兴庆区、西夏区、金凤区、贺兰县、永宁县和灵武市，地域面积9 491 km<sup>2</sup>，2017年年末城市建成区面积213 km<sup>2</sup>。2017年银川市常住人口222.54万，城镇化率77.09%，全市GDP为1 803.17亿元，按可比价格计算，同比增长8.0%，三次产业结构为3.4 : 50.4 : 46.2，对经济增长的贡献率分别为2.0%、41.7%、56.3%。按常住人口计算，2017年银川市人均地区生产总值81 656元，比上年增长6.5%，人均消费25 268元。近年来，银川市着力建设国家级能源基地，发展能源重化工业，在保

持经济较快增长的同时，区域生态环境与经济发展博弈问题日益突出，生态安全压力加大。2019年，银川市积极响应国家和宁夏回族自治区安排部署，着力推进全市生态经济建设。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

研究数据来源于2010—2018年《银川统计年鉴》、2010—2018年《银川市国民经济和社会发展统计公报》、2010—2018年《中国城市统计年鉴》和宁夏回族自治区自然资源厅公开数据。

### 2.2 生态足迹理论

生态足迹是指提供区域全部人口消费的资源 and 吸纳这些人口产生的废弃物所需要的生物生产性土地(陆地和水域)的总面积。生物生产性土地是为计算各类自然资本提出的统一度量标准，根据生产力差异分为6类，包括耕地、草地、林地、建筑用地、水域和化石能源用地。由于6类生物生产性土地的生态生产力是不同的，只有对各类生物生产性土地面积乘以一个均衡因子，才能实现6类生物生产性土地面积的可比性和可加性。某类生物生产性土地的均衡因子等于全球该类生物生产性土地的平均生态生产力除以全球所有各类生物生产性土地的平均生态生产力，本文选取2001—2007年均衡因子的均值(表1)。产量因子是区域某类生物生产性土地平均生产力与世界同类土地平均生产力的比率，本文产量因子采用国内已有研究成果(表1)。生物账户全球平均产量以及能源和污染账户折算系数来源于已有研究<sup>[18, 20, 25]</sup>。

表1 生物生产性土地均衡因子和产量因子

项目	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	化石能源用地	资料来源
均衡因子	2.34	1.64	0.48	0.32	2.34	1.64	文献[18]
产量因子	1.66	0.91	0.19	1.00	1.66	0.00	文献[26]

(1)生态足迹计算公式为：

$$EF = N \times ef = N \times \sum (r_j \times c_i / p_i) \quad (1)$$

式中： $EF$ 是总生态足迹， $ef$ 是人均生态足迹， $c_i$ 是第*i*项人均消费量， $r_j$ 是第*j*项生物生产性土地的均衡因子， $p_i$ 是第*i*种生态账户的全球平均产量， $N$ 是区域人口数。

计算能源消费和污染物账户时，根据改进生态足迹方法，需要通过相关能源账户的转化系数来折算成生物生产性土地面积，由于计算方法比较简单，本文不再赘述，详见何爱红等<sup>[26]</sup>的研究。

(2)生态承载力是指区域全部生物生产性土地面积的总和。生态承载力计算公式为：

$$EC = N \times ec = N \times \sum (a_j \times r_j \times y_j) \quad (2)$$

式中:  $EC$  是总生态承载力,  $ec$  是人均生态承载力,  $a_j$  是第  $j$  项生物生产性土地面积,  $r_j$  是第  $j$  项生物生产性土地的均衡因子,  $y_j$  是第  $j$  项生物生产性土地的产量因子,  $N$  是区域人口数。

(3) 生态盈亏( $ED$ )计算公式为:

$$ED=EC-EF \quad (3)$$

式中:  $ED > 0$ , 表示为生态盈余;  $ED < 0$ , 表示为生态赤字;  $ED = 0$ , 表示为生态平衡。

(4) 生态压力指数( $E_{pi}$ )是指区域生态足迹与生态承载力的比值, 反映生态系统受到人类活动影响的程度。生态压力指数计算公式为:

$$E_{pi}=EF/EC \quad (4)$$

当  $E_{pi} \leq 1$  时, 表明生态系统在人类活动的影响下还没有超过其自身反馈调节的阈值, 生态系统运行状况良好; 当  $E_{pi} > 1$  时, 表明生态系统面临巨大压力, 生态系统平衡被打破, 生态安全威胁增加。

(5) 生态足迹多样性指数( $H$ )反映了区域人类消费及吸纳其废弃物所需要的各种生物生产性土地面积的均衡水平, 计算公式为:

$$H=-\sum(p_j \times \ln p_j) \quad (5)$$

式中:  $p_j$  是指第  $j$  项生物生产性土地在区域生态足迹中的占比。  $H$  值越大, 表明区域生态足迹中各类生物生产性土地的分配越均衡, 生态系统稳定性越高。

(6) 改进的可持续发展能力指数( $c$ )<sup>[25]</sup> 是由区域人均生态足迹、生态足迹多样性指数、万元 GDP 生态盈亏共同决定的, 计算公式为:

$$c=ef \times H / A = ef \times [-\sum(p_i \times \ln p_i)] / A \quad (6)$$

式中:  $A$  为区域万元 GDP 生态盈亏。  $ef$  表示区域经济发展的能量消耗,  $H$  表示区域生态经济系统稳定性,  $c$  表示区域资源利用效率。  $c$  值越大表明区域生态经济系统可持续发展能力越强。

### 2.3 地理探测器

地理探测器(geodetector)是用来探测空间异质性以及揭示其背后驱动力的统计学方法, 其原理是一个自变量对另一个自变量有影响, 那么自变量与因变量的空间分布具有相似性, 自变量可以为类型量, 也可以为数值量(只需要进行适当的离散化处理)<sup>[27]</sup>。它主要包括交互探测、因子探测、风险探测和生态探测 4 个部分<sup>[28]</sup>。因子探测器主要用于探测自变量  $X$  在多大程度上解释了因变量  $Y$  的空间分异, 用  $q$  值<sup>[29]</sup> 度量,  $q$  值的取值范围是  $[0, 1]$ , 其值越大说明因变量的空间分异性越明显, 表示自变量的解释力越强。交互探测器用来探测不同因子是独立起作用还是具有交互作用。本文主要采用因子

探测器和交互探测器进行分析。

## 3 结果与分析

基于改进生态足迹计算方法, 生态足迹账户由生物资源账户(耕地、草地、林地、水域)、能源消费账户(化石能源用地、建筑用地)和污染物排放账户构成。污染物排放账户主要由废气( $SO_2$ 、烟尘和粉尘)、废水(工业废水和生活污水)、固体废弃物等构成, 考虑所需要的生物生产性土地类型, 分别将其计入林地、水域和建筑用地中。根据已有研究成果, 工业废水和生活污水排放按照占用湿地面积为  $365 \text{ t/hm}^2$ , 废气生态足迹按照森林阔叶林吸收  $SO_2$  的平均能力  $88.65 \text{ kg/hm}^2$ 、消除粉尘和烟尘能力按  $10.11 \text{ t/hm}^2$  标准计算, 固体废弃物按照填埋和堆积需要的单位土地面积  $10.19 \times 10^4 \text{ t/hm}^2$  标准折算。世界环境和发展委员会指出, 为保护生物多样性需要至少 12% 的生态容量被保存, 因此在计算银川市生态承载力时扣除了 12% 的生物生产性土地面积。

### 3.1 生态足迹结果与分析

由公式(1)计算得出银川市 2009—2017 年人均生态足迹(表 2)、主要能源和污染排放账户人均生态足迹和生态多样性指数(表 3)。结果显示, 银川市人均生态足迹由 2009 年的  $2.868 \text{ hm}^2/\text{人}$  增长到 2013 年的  $4.660 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 随后开始稳步下降至 2017 年的  $4.201 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 9 年间增长率为 46.478%。生物账户中耕地、水域、草地占比较高, 除草地增长明显外, 其余波动较小, 且生物账户占人均生态足迹比例有所下降; 草地账户占比高且增长明显, 表明银川市居民饮食结构中畜牧业产品消耗量越来越高, 生活方式的低碳化意识不足。建筑用地账户从 2009 年的  $0.015 \text{ hm}^2/\text{人}$  增长到 2017 年的  $0.039 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 涨幅达 160%, 主要表现在电力消耗和固体废弃物增长较快, 但是总账户占比较低; 固体废弃物增长较快与城市生产生活废弃物大量堆放、填埋处理有关, 资源利用率较低。人均生态足迹中化石能源账户占比最高, 从 2009 年的 43.515% 增长至 2017 年的 63.461%, 缘于银川市经济结构以能源重化工业为主导, 显示出银川市推进生态经济建设的现实意义。化石能源中原煤、石油、天然气为主要足迹账户, 原煤人均足迹始终占据主导地位, 石油人均足迹占比快速增长, 天然气人均足迹占比较小, 显示银川市能源消费中煤炭占比大, 依旧处于传统能源结构阶段, 居民能源消费结构不合理。污染物排放账户中,  $SO_2$  人均生态足迹 2009 年为  $0.135 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 2012 年达到  $0.583 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 2009—2012 年呈现高速增长趋势; 2012—2017 年呈现稳步下降趋势,

2017年为0.070 hm<sup>2</sup>/人；工业废水人均生态足迹2009年为0.080 hm<sup>2</sup>/人，2017年为0.028 hm<sup>2</sup>/人，下降趋势明显；生活污水人均生态足迹从2009年的0.065 hm<sup>2</sup>/人增长到2017年的0.077 hm<sup>2</sup>/人，9年间增长18.462%，说明居民节水意识有待增强。2009—2017年银川市生态足迹多样性指数由1.442下降到1.147，说明生态足迹分配趋向于失衡状态，生态经济系统稳定性降低。

表2 银川市2009—2017年人均生态足迹

单位：hm<sup>2</sup>/人

账户	项目	年份								
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
化石能源账户	原煤	0.812	0.727	0.743	0.774	0.790	0.810	0.861	0.872	0.753
	天然气	0.255	0.219	0.316	0.365	0.397	0.345	0.323	0.297	0.314
	煤气	0.008	0.006	0.025	0.028	0.044	0.028	0.076	0.072	0.073
	石油	0.439	0.467	0.533	0.575	0.614	0.646	0.667	0.712	0.723
建设用地账户	电力	0.015	0.018	0.024	0.031	0.033	0.035	0.036	0.032	0.039
污染排放账户	SO <sub>2</sub>	0.135	0.136	0.420	0.583	0.500	0.358	0.338	0.125	0.070
	工业废水	0.080	0.080	0.087	0.080	0.081	0.071	0.062	0.046	0.028
	生活污水	0.065	0.063	0.062	0.065	0.068	0.073	0.029	0.078	0.077

表3 主要能源和污染排放账户人均生态足迹和生态足迹多样性指数

年份	耕地 / (hm <sup>2</sup> /人)	林地 / (hm <sup>2</sup> /人)	草地 / (hm <sup>2</sup> /人)	水域 / (hm <sup>2</sup> /人)	建筑用地 / (hm <sup>2</sup> /人)	化石能源用地 / (hm <sup>2</sup> /人)	生态足迹多样性指数	人均生态足迹 / (hm <sup>2</sup> /人)
2009	0.557	0.148	0.458	0.442	0.015	1.248	1.442	2.868
2010	0.240	0.152	0.419	0.415	0.018	1.759	1.245	3.003
2011	0.368	0.433	0.443	0.440	0.024	1.936	1.365	3.644
2012	0.470	0.598	0.451	0.398	0.031	2.031	1.395	3.979
2013	0.448	0.517	0.469	0.497	0.033	2.696	1.290	4.660
2014	0.419	0.374	0.508	0.499	0.035	2.750	1.252	4.585
2015	0.433	0.355	0.483	0.454	0.036	2.784	1.230	4.545
2016	0.434	0.143	0.480	0.495	0.032	2.718	1.165	4.302
2017	0.416	0.090	0.519	0.471	0.039	2.666	1.147	4.201

### 3.2 生态承载力结果与分析

由公式(2)计算得出2009—2017年银川市人均生态承载力(表4)，结果已经扣除12%的生物生产性土地面积。结果显示，银川市人均生态承载力由2009年的0.487 hm<sup>2</sup>/人下降到2017年的0.384 hm<sup>2</sup>/人，降幅达21.150%。2009—2017年，除了建筑用地人均生态承载力由0.099 hm<sup>2</sup>/人增加到0.106 hm<sup>2</sup>/人，其余耕地、林地、草地、水域人均生态承载力都有所下降；耕地贡献了主要的人均生态承载力，占比始终处于70%以上。虽然耕地、林地、草地、水域总承载力有所降低，但绝大部分转化成了承载力更高的建筑用地，使得银川市总生态承载力始终是增长的。因此，银川市人均生态承载力下降主要缘于人口过快增长。银川市自然本底脆弱，受自然和人为因素综合影响，现有土地中存在大量沙地和裸地。通过对沙地和裸地等的修复与治理可以显著增加银

川市的生物生产性土地面积供给，从而缓解因人口及其消费增长带来的生态承载力下降趋势。

表4 银川市2009—2017年人均生态承载力

单位：hm<sup>2</sup>/人

年份	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	化石能源用地	总计	人均生态承载力
2009	0.375	0.056	0.017	0.007	0.099	0.000	0.553	0.487
2010	0.313	0.047	0.012	0.006	0.089	0.000	0.467	0.411
2011	0.310	0.046	0.012	0.006	0.092	0.000	0.465	0.409
2012	0.305	0.045	0.012	0.006	0.098	0.000	0.465	0.409
2013	0.298	0.044	0.011	0.005	0.101	0.000	0.460	0.405
2014	0.291	0.043	0.011	0.005	0.102	0.000	0.452	0.398
2015	0.285	0.042	0.011	0.005	0.105	0.000	0.448	0.394
2016	0.280	0.041	0.011	0.005	0.106	0.000	0.443	0.390
2017	0.274	0.041	0.011	0.005	0.106	0.000	0.436	0.384

### 3.3 可持续发展能力评价结果与分析

由公式(4)~(6)分别计算出2009—2017年银川市生态盈亏、生态压力指数、可持续发展能力指数，同时计算出银川市万元GDP生态足迹，结果如图1、图2所示。万元GDP生态足迹反映出区域经济发展中的自然资源利用效率，其值越小说明资源利用效率越高。由图2可见，银川市万元GDP生态足迹由2009年的0.758 hm<sup>2</sup>/人下降到2017年的0.518 hm<sup>2</sup>/人，总体呈下降趋势。这表明银川市经济增长过程中虽然对自然资源需求总量增长，但是资源利用趋向于集约、节约型。由图1可知，银川市2009—2017年经济社会发展始终处于生态赤字状态，人均生态赤字在2009—2013年处于增长状态，在2013—2017年处于下降状态。全球人均生态赤字为0.4 hm<sup>2</sup>/人，中国人均生态赤字为0.645 hm<sup>2</sup>/人<sup>[25]</sup>，银川市均远高于二者的水平。总体来看，由于银川市人均生态承载力持续下降，人均生态赤字下降主要取决于人均生态足迹下降，说明银川市生态经济系统的经济子系统部分领域正向好发展。

生态压力指数反映了区域生态环境系统的承压程度。银川市生态压力指数虽然呈现“先增长、后下降”的趋势，但是生态环境压力依然较大，表现为2009—2015年生态压力指数由5.892增长到11.537，然后下降到2017年的10.936。可持续发展能力指数综合反映了区域生态经济系统中人类活动对自然资源的生态需求和生态系统对自然资源的生态供给能力<sup>[25]</sup>。银川市可持续发展能力指数稳步增长，由2009年的6.575增长到2017年的10.230，增幅达55.590%。这说明从系统角度看，银川市可持续发展能力是显著增强的。

### 3.4 地理探测结果与分析

为进一步研究银川市生态足迹变化驱动力，文章在参考周静和管卫华<sup>[19]</sup>、杨灿和朱玉林<sup>[30]</sup>已有研究的基础上，在生态经济系统框架(生态、经济、技术子系统)

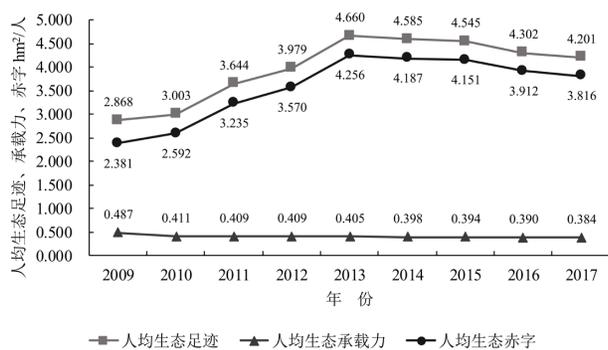


图1 银川市2009—2017年人均生态赤字、人均生态足迹、人均生态承载力

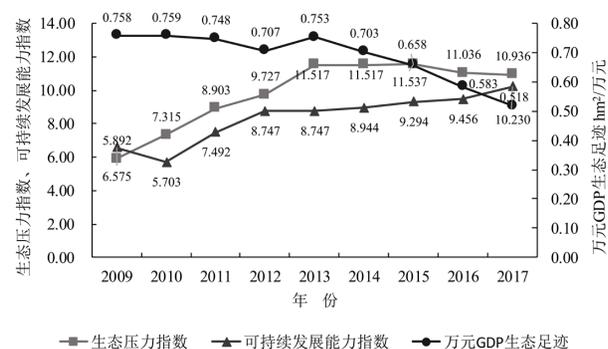


图2 银川市2009—2017年可持续发展能力、生态压力、万元GDP生态足迹

下构建了银川市生态足迹变化驱动因素指标体系(表5),借助地理探测器的因子探测和交互探测对影响因素及其相互作用进行了探测。

由表6可知,按照解释强弱并通过显著性检验( $p < 0.1$ )进行排序: $X_8 > X_7 > X_2 > X_5 > X_9 > X_{13} > X_{11}$ ,表明人均GDP、第三产业占GDP比重、污水处理率、第一产业产值、人均社会消费总额、专利授权量、人均固定资产投资等对银川市生态足迹变化影响作用较大。其

表6 不同类型影响因子q值统计

项目	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
q	0.302	0.847	0.389	0.434	0.847	0.186	0.820	0.939	0.810	0.574	0.811	0.819	0.810	0.484	0.745
p	0.691	0.022	0.359	0.708	0.022	0.988	0.008	0.000	0.031	0.193	0.059	0.181	0.031	0.658	0.248

表7 银川市生态足迹变化影响因子之间的交互作用

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
$X_1$	0.302														
$X_2$	0.933	0.847													
$X_3$	0.985	0.924	0.389												
$X_4$	0.931	0.926	0.999	0.434											
$X_5$	0.933	0.864	0.924	0.926	0.847										
$X_6$	0.422	0.933	0.538	0.996	0.933	0.186									
$X_7$	0.864	0.917	0.960	0.939	0.917	0.855	0.820								
$X_8$	0.981	0.962	0.960	0.995	0.962	0.982	0.958	0.939							
$X_9$	0.939	0.865	0.934	0.928	0.865	0.899	0.925	0.982	0.810						
$X_{10}$	0.867	0.866	0.853	0.941	0.866	0.640	0.842	0.960	0.877	0.574					
$X_{11}$	0.939	0.866	0.924	0.939	0.866	0.900	0.915	0.972	0.843	0.866	0.811				
$X_{12}$	0.932	0.873	0.938	0.925	0.873	0.907	0.929	0.980	0.839	0.881	0.846	0.819			
$X_{13}$	0.939	0.865	0.934	0.928	0.865	0.899	0.925	0.982	0.831	0.877	0.843	0.839	0.810		
$X_{14}$	0.942	0.940	0.881	0.685	0.940	0.586	0.941	0.971	0.867	0.656	0.867	0.868	0.867	0.484	
$X_{15}$	0.981	0.928	0.859	0.995	0.928	0.914	0.964	0.963	0.914	0.859	0.896	0.904	0.914	0.807	0.745

表5 银川市生态足迹变化驱动因素指标体系

一级指标	二级指标	自变量
生态子系统	建成区绿化覆盖率/%	$X_1$
	污水处理率/%	$X_2$
	人均绿化面积/ $m^3$	$X_3$
	废气排放量/t	$X_4$
经济子系统	第一产业产值/万元	$X_5$
	第二产业产值/万元	$X_6$
	第三产业占GDP比重/%	$X_7$
	人均GDP/元	$X_8$
	人均社会消费总额/元	$X_9$
	常住人口数/人	$X_{10}$
	人均固定资产投资/元	$X_{11}$
技术子系统	科技支出/万元	$X_{12}$
	专利授权量/件	$X_{13}$
	万人研究、技术人员数/人	$X_{14}$
	R&D人员全时当量/时	$X_{15}$

中人均GDP和第三产业占GDP比重显著性检验 $p < 0.01$ ,说明银川市生态足迹增长是由经济子系统主导的。

交互探测用于探测识别不同影响因素之间是否存在交互作用,如果存在交互作用,是否会增加或者减弱对因变量的解释力。由表7可知,所有的影响因素之间均存在交互作用,所有影响因素交互后,得分均大于单个因素,其中 $X_1 \cap X_3$ 、 $X_1 \cap X_5$ 、 $X_3 \cap X_5$ 、 $X_5 \cap X_7$ 作用显著增强,也就表明影响因素的共同作用均显著增加了对银川市生态足迹变化的解释力。

#### 4 结论

文章基于改进生态足迹模型对银川市2009—2017年生态经济发展状况进行定量分析,在生态经济系统框架下探测了银川生态足迹变化主要影响因素,并对银川市生态经济可持续发展提出政策建议。结论如下:

(1) 2009—2017年银川市人均生态足迹表现为“先增长,后下降”趋势,9年间增长率为46.478%。2009—2017年银川市人均生态承载力持续下降,虽然生态承载

力表现为总量增长，但由于人口增长过快，导致了人均值下降。银川市生态赤字显著，明显高于全球生态赤字 $0.4 \text{ hm}^2/\text{人}$ 的水平，结合生态压力指数分析，显示生态环境压力较大。

(2)生态足迹多样性指数表明银川市生态足迹分配趋向于失衡状态，生态经济系统稳定性降低；可持续发展能力指数稳步增长，表明尽管生态赤字较高、生态压力较大，但是银川市经济结构优化、科技水平提高对生态经济系统的发展是积极的。

(3)因子探测结果表明经济子系统对银川市人均生态足迹影响处于主导地位，并且表现为“经济子系统>生态子系统>技术子系统”。交互探测显示所有因素均存在相互作用，且交互解释力均大于单一因素，其中 $X_1 \cap X_3$ 、 $X_1 \cap X_5$ 、 $X_3 \cap X_5$ 、 $X_5 \cap X_7$ 作用显著增强。

(4)针对银川市生态经济发展状况，应从生态、经济、技术三个方面采取措施提升其可持续发展能力。其一，在生态方面要持续推进辖区内生物保护地修复与治理、国土空间绿化工程，做好污染防治与减排工作；其二，在经济方面要处理好经济规模和发展质量的关系，提高第三产业在经济结构中的比例，引导人们树立低碳消费理念；其三，在技术方面要积极引进科技创新人才，着力推进科技成果产业化转化，提高资源能源利用效率。□

#### 参考文献：

- [1]诸大建. 可持续性科学：基于对象—过程—主体的分析模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(7): 1-9.
- [2]杨屹, 加涛. 21世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. 生态学报, 2015(24): 7987-7997.
- [3]Butchart S H M, Walpole M, Collen B, et al. Global biodiversity: Indicators of recent declines [J]. Science, 2010, 328(5982): 1164-1168.
- [4]徐中民, 张志强, 程国栋. 可持续发展定量研究的几种新方法评介[J]. 中国人口·资源与环境, 2000(2): 61-65.
- [5]徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000(5): 607-616.
- [6]肖建红, 于庆东, 刘康, 等. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估——以舟山群岛为例[J]. 地理学报, 2011(6): 842-852.
- [7]魏黎灵, 李岚彬, 林月, 等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J]. 生态学报, 2018(12): 4317-4326.
- [8]张红, 陈嘉伟, 周鹏. 基于改进生态足迹模型的海岛城市土地承载力评价——以舟山市为例[J]. 经济地理, 2016(6): 155-160, 167.
- [9]靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例[J]. 生态学报, 2017(9): 2982-2993.
- [10]郑艳茹, 郑艳东, 葛京凤, 等. 基于生态足迹模型的河北

- 省土地利用总体规划实施评价[J]. 水土保持研究, 2014(5): 230-235.
- [11]方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 2013(9): 1657-1667.
- [12]秦超, 李君软, 陈宏飞. 基于三维生态足迹的锡林郭勒盟自然资本动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015(9): 51-56.
- [13]马玉香, 陈学刚, 高素芳. 基于生态足迹的新疆可持续发展建设用地面积预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011(5): 25-29.
- [14]楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值改进生态足迹的长株潭城市群可持续发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012(2): 145-150.
- [15]郝希, 乔元波, 武康平, 等. 可持续发展视角下的城镇化与都市化抉择——基于国际生态足迹面板数据实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(2): 47-56.
- [16]郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 等. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用时空演变及驱动力分析[J]. 地理科学进展, 2018(10): 1328-1339.
- [17]田龙, 张青峰, 张翔, 等. 基于改进生态足迹模型的西北地区生态可持续性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015(8): 76-81.
- [18]杨屹, 加涛. 21世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. 生态学报, 2015(24): 7987-7997.
- [19]周静, 管卫华. 基于生态足迹方法的南京可持续发展研究[J]. 生态学报, 2012(20): 6471-6480.
- [20]马莉娅, 吴斌, 张宇清, 等. 基于生态足迹的宁夏盐池县生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2011(5): 57-62.
- [21]王宏卫, 安秀峰, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于乡镇尺度的克里雅河绿洲生态承载力分析——以于田县13个乡镇生态承载力为例[J]. 干旱区资源与环境, 2015(10): 48-55.
- [22]毛伟伟, 田珍. 辽宁大学崇山校区生态足迹研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2019(2): 167-174.
- [23]方恺. 足迹家族：概念、类型、理论框架与整合模式[J]. 生态学报, 2015(6): 1647-1659.
- [24]盛业旭, 刘琼, 欧名豪, 等. 基于能值—生态足迹修正模型的区域可持续发展研究——以江苏省南通市为例[J]. 水土保持通报, 2014(3): 211-217.
- [25]张佳琦, 段玉山, 伍燕南. 基于生态足迹的苏州市可持续发展动态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015(2): 177-184.
- [26]何爱红, 王亦龙, 向党, 等. 基于生态足迹的宁夏回族自治区可持续发展评价[J]. 干旱区地理, 2013(5): 906-912.
- [27]王劲峰, 徐成东. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报, 2017(1): 116-134.
- [28]文琦, 施琳娜, 马彩虹, 等. 黄土高原村域多维贫困空间异质性研究——以宁夏彭阳县为例[J]. 地理学报, 2018(10): 1850-1864.
- [29]费怡, 王继燕, 王泽根. 若尔盖高原土地沙化及其成因定量分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019(8): 146-152.
- [30]杨灿, 朱玉林. 绿色发展视阈下的湖南省生态足迹驱动力因素分析[J]. 经济地理, 2020(4): 195-203.
- [31]王立群, 李冰, 郭轲. 北京市生态足迹变化及其社会经济驱动因子分析[J]. 城市问题, 2014(7): 2-8.