

# 基于 DPSIR 模型的黄河流域生态安全 评价及影响因素研究

吴艳霞, 魏志斌, 王爱琼

(西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 对黄河流域生态安全进行评价并分析其影响因素, 为促进黄河流域生态高质量发展和实施黄河国家战略提供理论依据。[方法] 基于 DPSIR 模型构建生态安全指标体系, 运用熵权-TOPSIS 法对 2011—2020 年黄河流域沿线省域生态安全进行评价, 并利用 BP-DEMATEL 模型剖析生态安全关键因素。[结果] ①黄河流域生态安全整体水平较低但呈缓慢上升的态势, 10 a 来生态安全指数均值未超过 0.4, 但从 2011 年的 0.322 逐步上升至 2020 年的 0.365。②各省区生态安全呈现上升、波动和衰退 3 种演变态势, 生态安全指数均值从高到低依次为: 山东(0.431)、四川(0.372)、内蒙古(0.371)、河南(0.362)、山西(0.349)、宁夏(0.343)、陕西(0.326)、甘肃(0.302)、青海(0.301)。③BP-DEMATEL 结果表明, 生态安全呈上升态势的省域关键因素分散于压力指标层外, 呈波动和衰退态势的省域关键因素分别集中分布在影响和压力指标层。[结论] 黄河流域生态安全整体呈现良性的演变态势, 但区域发展不均衡, 各省域应围绕关键因素实施调控。

**关键词:** 生态安全; DPSIR 模型; 熵权-TOPSIS 法; BP-DEMATEL 模型; 关键因素

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)06-0322-10

**中图分类号:** F124.3

**文献参数:** 吴艳霞, 魏志斌, 王爱琼. 基于 DPSIR 模型的黄河流域生态安全评价及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 322-331. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.039; Wu Yanxia, Wei Zhibin, Wang Aiqiong. Ecological safety evaluation and influencing factors of Yellow River basin based on DPSIR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 322-331.

## Ecological Safety Evaluation and Influencing Factors of Yellow River Basin Based on DPSIR Model

Wu Yanxia, Wei Zhibin, Wang Aiqiong

(School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological safety of the Yellow River basin was evaluated and the influencing factors were analyzed in order to promote high-quality ecological development of the Yellow River basin and to implement the “Yellow River National Strategy”. [Methods] An ecological safety index system was constructed based on the DPSIR model. The entropy weight-TOPSIS method was used to comprehensively evaluate the ecological safety of the provinces along the Yellow River basin from 2011 to 2020. The BP-DEMATEL model was used to analyze the key factors of ecological safety. [Results] ① The overall level of ecological safety in the Yellow River basin was low, but showed a slow upward trend. The average ecological safety index was no more than 0.4 in the past 10 years, but has gradually increased from 0.322 in 2011 to 0.365 in 2020. ② The ecological safety of each province showed three evolutionary trends of rising, fluctuating, and declining. The average ecological safety indexes, from high to low, were: Shandong (0.431), Sichuan (0.372), Inner Mongolia (0.371), He'nan (0.362), Shanxi (0.349), Ningxia (0.343), Shaanxi (0.326), Gansu (0.302), Qinghai (0.301). ③ The BP-DEMATEL results showed that the key factors of the provinces with upward trends of ecological safety were scattered outside the pressure index layer. The key factors of the provinces with fluctuating and declining trends were concentrated in the impact and pressure index layers,

收稿日期: 2022-01-09

修回日期: 2022-04-20

资助项目: 国家社会科学基金项目“新发展阶段黄河流域生态安全评价、预警及实现机制研究”(21BJY169)

第一作者: 吴艳霞(1964—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 研究生导师, 主要从事技术经济及管理、区域经济发展方面的研究。  
Email: 2214861742@qq.com.

通讯作者: 魏志斌(1998—), 男(汉族), 河南省焦作市人, 硕士研究生, 研究方向为技术经济及管理。Email: 825274191@qq.com.

respectively. [Conclusion] The ecological safety of the Yellow River basin as a whole showed a benign evolution trend, but regional development was unbalanced. Provinces should implement regulation and control around key factors.

**Keywords:** ecological safety; DPSIR model; entropy weight-TOPSIS method; BP-DEMATEL model; key factors

生态安全最早由 Lester<sup>[1]</sup>于 1981 年在《建设一个持续发展的社会》一书中定义为生物在生存发展过程中自身内部与外部环境协调、可持续的一种状态。1989 年,国际应用系统分析所(IIASA)拓展了该理论,将其定义为在社会、自然交叉的复合系统中,人类自身生存发展、身体健康、基本权利等得到保障、不受威胁的状态即为生态安全<sup>[2]</sup>。由此,学者们针对生态安全展开了多元化研究,而生态安全评价作为其中的研究热点颇受学者青睐<sup>[3]</sup>。早期生态安全评价研究主要以评估生态损害程度为主,以美国环保局为代表的相关单位通过对部分遭遇环境污染或者其他生态损害问题的地区进行评估,并利用技术手段进行生态治理恢复,其研究方向、方式单一,不具有普适性<sup>[2,4]</sup>。随着相关理论、方法的丰富,研究呈现出宽领域、多尺度的特点,多以某一区域为核心,基于不同视角,对其间的城市、湖泊、流域等展开研究,其结果更具客观性,更能揭示问题本质核心<sup>[4-6]</sup>。吴艳霞等<sup>[7]</sup>基于 Lotka-Volterra 共生模型,以共生度来评判长江经济带生态安全;王文萱等<sup>[8]</sup>利用综合权重物元法从空间格局演变视角对湖南省土地生态安全展开研究;崔馨月等<sup>[9]</sup>以长三角城市群为研究对象,采用 DPSIR 模型、主成分分析法展开生态安全评价。梳理文献发现,既有研究集中于不同地域<sup>[6-10]</sup>、不同视角(共生度<sup>[7]</sup>、协调度等<sup>[11]</sup>)的生态安全评价研究,但缺少对生态安全影响因素以及影响因素间作用的分析,各种对策建议缺乏理论支撑,研究成果欠缺现实意义。因此,本文构建 DPSIR 生态安全指标体系,利用熵权-TOPSIS 法对黄河流域生态安全现状进行评价,进一步利用 BP-DEMATEL 模型对影响因素展开分析,梳理其间关键因素,基于现状和关键因素制定针对性提升策略,以期丰富和拓展生态安全理论框架,同时推动黄河流域生态安全健康发展。

# 1 研究区概况、数据来源及研究方法

## 1.1 研究区概况及数据来源

黄河流域位于东经 96°—119°、北纬 32°—42°,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东共 9 个省域,全长 5 464 km,流域面积高达 75 240 km<sup>2</sup>。然而作为我国重要的生态屏障以及能源基地,黄河流域整体发展相对滞后,产业结构以第

二产业为主,第三产业所占比例低于全国平均水平;区域发展不协调,呈现东部发达、中部崛起、西部落后的态势,2020 年山东生产总值为 73 129 亿元,占黄河流域整体生产总值的 1/3;作为我国西北部连接东部沿海的生态走廊,生态损害极为严重,2020 年水土流失面积高达 26 270 km<sup>2</sup>,且人均水资源量不足 600 m<sup>3</sup>。因此,对黄河流域生态安全展开研究,明晰黄河流域生态安全现状及关键因素,由此制定针对性的提升策略,有助于促进黄河流域高质量发展。

本研究数据来源于《中国统计年鉴》《黄河流域九省统计年鉴》和各地级市统计年鉴,同时利用插值法、随机森林以及拟合回归等对缺失数据进行插补,最终获得 2011—2020 年黄河流域 9 个省域的生态安全面板数据。

## 1.2 研究方法

1.2.1 研究设计 本文基于 DPSIR 模型构建指标体系,利用熵权-TPOSIS 法计算生态安全指数,将 DP-SIR 模型选取的各项指标数据作为 BP-DEMATEL 模型的输入层,将生态安全指数作为输出层,构建直接关联矩阵,最终计算得出生态安全关键因素,整体研究设计路线如图 1 所示。

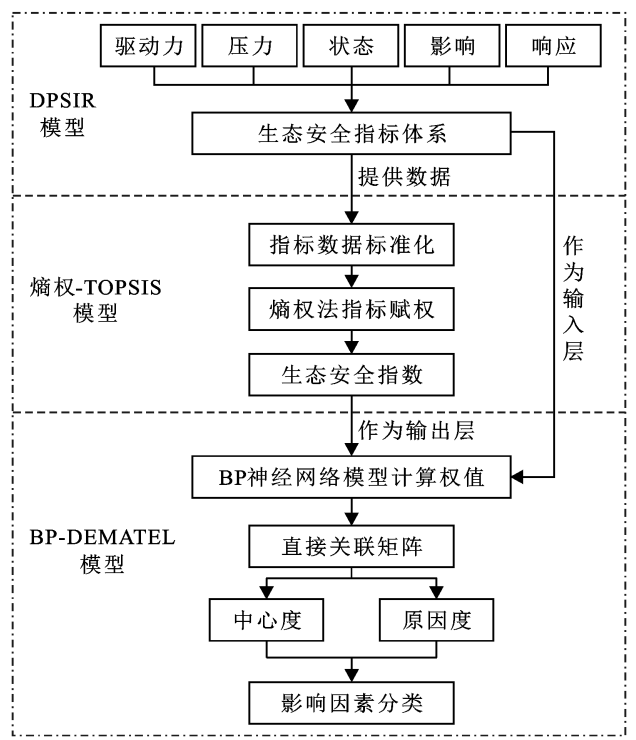


图 1 研究设计路线图

1.2.2 DPSIR 模型构建生态安全指标体系 生态安全作为包含环境、经济、社会等多个要素的复合系统,单纯利用少量缺乏生态含义的指标无法对生态安全进行精准的量化分析,因此需要构建综合性、科学性的指标体系<sup>[7]</sup>。1997 年欧洲环境署提出的 DPSIR

[driving(驱动力); pressure(压力); state(状态); impact(影响); response(响应)模型],兼具生态因素间的信息耦合以及生态演化的内在机理,能够灵活、清晰地描述生态安全现状<sup>[12-15]</sup>,其运行逻辑如图 2 所示。

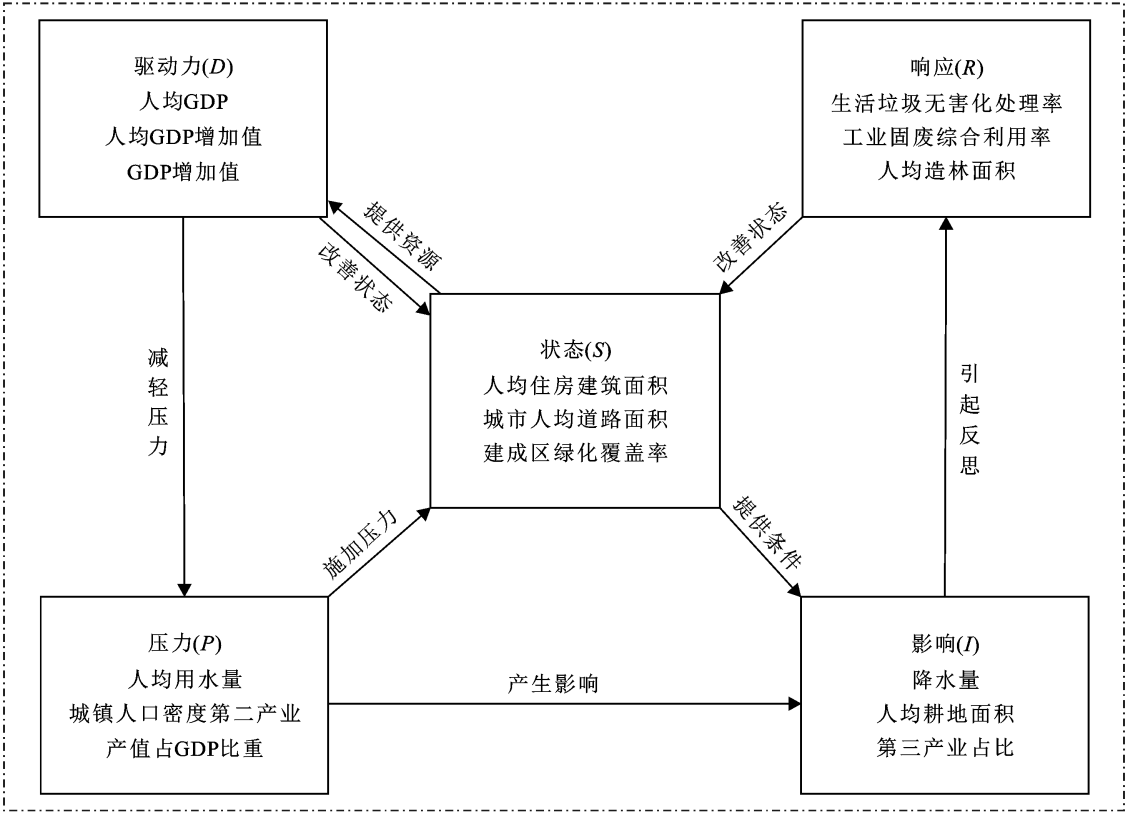


图 2 DPSIR 模型运行逻辑示意图

驱动力(D)吸纳资源改善环境状态(S),同时减轻生态压力(P),由压力(P)导致的生态影响(I)会引起人类反思进而做出改善环境的积极响应(R),由此改善环境状态(S)<sup>[8,16]</sup>。在相关学者研究基础上<sup>[10,15-16]</sup>,遵循科学性、可靠性、整体性和综合性原则,充分考虑黄河流域生态特征,结合指标生态内涵,选取了 28 个生态安全指标,并标号  $F_1, F_2, \dots, F_{28}$ ,构建黄河流域生态安全指标体系(表 1)。①状态(S)表征生态环境的现实表象。城市人均道路、人均公园绿地面积可以表示出城市建设水平以及绿化状态。人均水资源量、空气质量优良率和突发环境次数则分别从可利用水资源、大气质量、环境稳定状态 3 个层面表示生态文明建设状况。②驱动力(D)表征能够改善生态环境的现实动力及基础。人均 GDP 表征经济强度,是推动区域发展的核心。GDP 增长率衡量经济发展活力,表示区域经济发展的能动性。固定资产投资、人均可支配收入和一般公共预算支出分别

从城市建设、居民消费能力和社会发展 3 个方面诠释对区域发展的驱动。③压力(P)表征抑制生态环境健康发展的因素。人均用水量表示居民生活用水对于有限水资源产生的压力。单位 GDP 工业粉尘排放量、单位 GDP 废水排放量、单位 GDP 能耗和第二产业所占比例分别从空气质量、水污染、能源消耗和产业结构 4 个方面表示工业对生态环境产生的压力。④影响(I)表征人类活动对于生态环境的影响。人均耕地面积和可吸入颗粒物平均浓度表示人类生产对土地资源以及大气环境的影响。第三产业占比和建成区绿化覆盖率表示区域产业结构以及城市环境受到的影响。⑤响应(R)表征人类改善生态环境的实际举措。生活垃圾无害化处理率和人均造林面积表示社会层面对生态生活做出的积极响应。工业固废综合利用率表示对工业污染的治理。节能环保支出、环境治理投资占 GDP 比重表示政府层面对改善生态的支持。

表 1 黄河流域生态安全指标体系

准则层	指标层	指标释义	标号	指标性质	权重
状态 S	城市人均道路面积/(人·m <sup>-2</sup> )	城市建设状态	F <sub>1</sub>	+	0.045
	人均公园绿地面积/m <sup>2</sup>	城市绿化状态	F <sub>2</sub>	+	0.012
	人均水资源量(m <sup>3</sup> /人)	可利用水资源状态	F <sub>3</sub>	+	0.109
	空气质量优良率/%	大气质量状态	F <sub>4</sub>	+	0.015
	突发环境事件次数/次	环境稳定状态	F <sub>5</sub>	—	0.003
驱动力 D	人均 GDP/元	经济强度驱动力	F <sub>6</sub>	+	0.025
	GDP 增长率/%	经济发展驱动力	F <sub>7</sub>	+	0.074
	固定资产投资/亿元	城市建设驱动力	F <sub>8</sub>	+	0.071
	人均可支配收入(元/人)	居民消费驱动力	F <sub>9</sub>	+	0.030
	一般公共预算支出/亿元	社会发展驱动力	F <sub>10</sub>	+	0.040
压力 P	单位 GDP 工业烟粉尘排放量(t/亿元)	空气环境压力	F <sub>11</sub>	—	0.066
	单位 GDP 废水排放量(t/万元)	水污染压力	F <sub>12</sub>	—	0.033
	单位 GDP 能耗(t/万元,以标准煤计)	能源消耗压力	F <sub>13</sub>	—	0.056
	人均用水量(m <sup>3</sup> /人)	居民用水压力	F <sub>14</sub>	—	0.086
	第二产业产值占 GDP 比重/%	产业结构压力	F <sub>15</sub>	—	0.021
影响 I	人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	耕地生态影响	F <sub>16</sub>	+	0.067
	第三产业比例/%	产业结构影响	F <sub>17</sub>	+	0.021
	可吸入颗粒物平均浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	大气环境影响	F <sub>18</sub>	—	0.043
	建成区绿化覆盖率/%	城市环境影响	F <sub>19</sub>	+	0.013
响应 R	生活垃圾无害化处理率/%	生态生活响应	F <sub>20</sub>	+	0.008
	工业固废综合利用率/%	工业响应	F <sub>21</sub>	+	0.038
	人均造林面积/m <sup>3</sup>	林业响应	F <sub>22</sub>	+	0.047
	节能环保财政支出/亿元	社会发展响应	F <sub>23</sub>	+	0.043
	环境治理投资占 GDP 比重/%	政府政策响应	F <sub>24</sub>	+	0.036

1.2.3 熵权-TOPSIS 生态安全评价模型构建

TOPSIS 法称为逼近理想排序法,是通过计算评价方案与理想解和负理想解欧氏距离的多目标分析决策方法,能够精准地表示各个评价方案间的差距<sup>[14,17]</sup>。本文采用改进的 TOPSIS 法,用熵权法确定权重,计算各省域生态安全指数,较之传统的 TOPSIS 法其结果具客观性<sup>[14]</sup>。具体计算步骤:

(1) 数据标准化。

对于正向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \tag{1}$$

对于负向指标:

$$y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \tag{2}$$

式中: $y_{ij}$  为标准化的指标; $x_{ij}$  为原始指标; $\max x_j$ ,  $\min x_j$  表示  $j$  指标下最大值和最小值。

(2) 计算指标权重。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \tag{3}$$

式中: $H_j$  为第  $j$  个指标的熵值, $k=1/\ln m$ ,  $f_{ij}=y_{ij}/$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij}。$$
$$\omega_j = \frac{(1-H_j)}{\sum_{i=1}^n (1-H_j)} \tag{4}$$

式中: $\omega_j$  为第  $j$  个指标的熵权; $H_j$  为第  $j$  个指标的熵值,各指标权重详见表 1。

(3) 计算加权标准化矩阵。

$$T = (t_{ij})_{m \times n} = Y_{ij} \cdot W_j \tag{5}$$

式中: $T$  为加权标准化后的指标矩阵; $Y_{ij}$  标准化后的指标矩阵; $W_{ij}$  为权重矩阵。

(4) 确定正负理想解。

$$T^+ = \{\max T_{ij} | j=1,2,3,\cdots,n\} \tag{6}$$

$$T^- = \{\min T_{ij} | j=1,2,3,\cdots,n\} \tag{7}$$

式中: $T^+$  为正理想解; $T^-$  为负理想解。

(5) 计算各指标到正理想解与负理想解的距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_i^+)^2} \quad (i=1,2,3,\cdots,m) \tag{8}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_i^-)^2} \quad (i=1,2,3,\cdots,m) \tag{9}$$

式中: $D_i^+$  为到正理想解的距离,越小越优; $D_i^-$  为到

负理想解的距离,越大越优。

(6) 计算贴近度。

$$C_i=\frac{D_i^-}{D_i^-+D_i^+}$$

(10)

式中: $C_i$  为贴近度,处于 $[0,1]$ 范围内,其值越大表明生态安全发展状况越优,引申为生态安全指数<sup>[14-15,17]</sup>。

1.2.4 BP-DEMATEL 影响因素分析模型构建 决策实验室分析法(DEMATEL)是由美国 Battelle<sup>[18]</sup>实验室 1971 年提出来为研究世界复杂问题的将图论

和矩阵相结合的系统分析方法。通过挖掘因素间逻辑关系,构建直接关联矩阵,计算各因素影响度和被影响度,最终得到原因度与中心度,由此分析因素间作用逻辑及重要程度。传统 DEMATEL 方法通过专家打分或调查问卷计算直接关联矩阵,主观性较强,导致研究结果与实际偏离程度较大。通过引入 BP 神经网络,构建从输入层到输出层的非线性映射,利用权值向量计算直接关联矩阵,避免主观因素对结果的影响<sup>[18-19]</sup>。BP-DEMATEL 计算流程如图 3 所示。

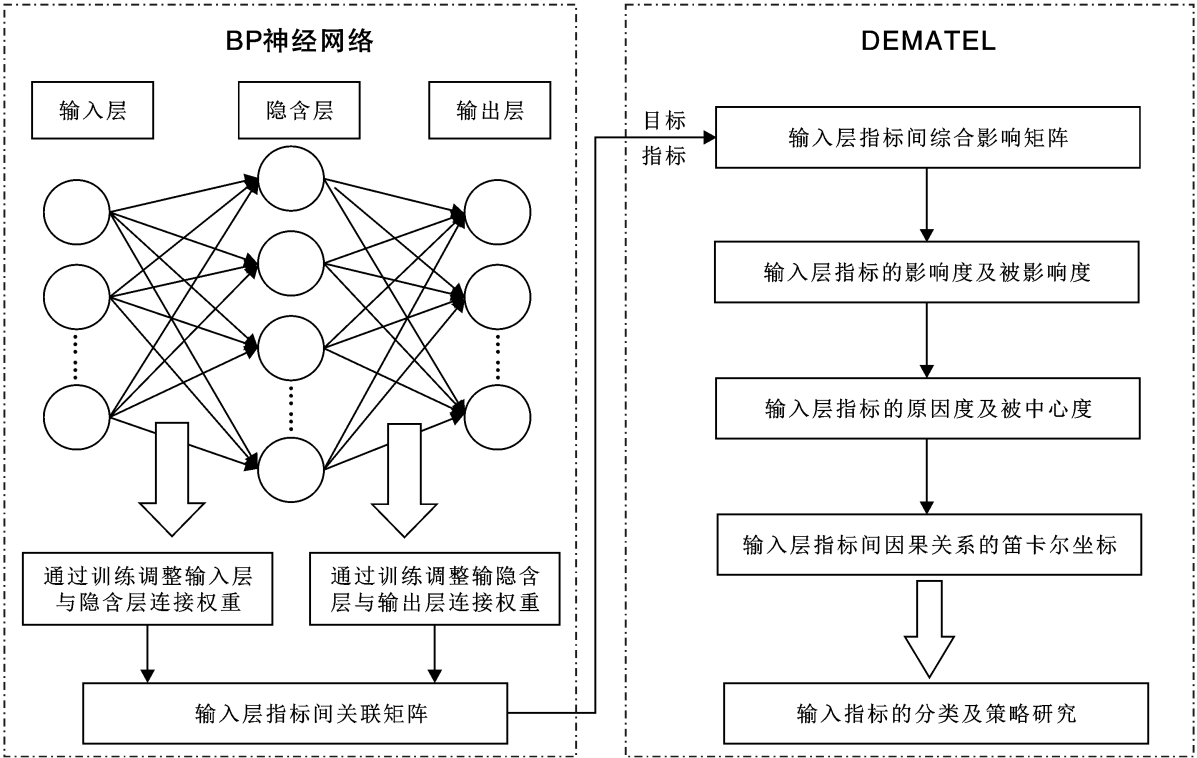


图 3 BP-DEMATEL 运算流程图

(1) 计算权值向量。

确定影响因素矩阵  $x=(x_{ij})_{m\times n}$  以及目标因素矩阵  $y=(y_{ij})_{m\times k}$ , 进行标准化处理后作为 BP 神经网络的输入层和输出层, 利用非线性映射关系计算出输入层和隐含层以及隐含层和输出层的权值矩阵  $W_{n\times t}$   $w_{n\times k}$ , 最后进行权值向量  $\omega$  的计算:

$$\omega=\text{mean}(|W|\times|\tau w|)$$

(11)

式中: $\omega=\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$ ,  $||$  表示取各元素的绝对值; mean 函数表示当  $|W|\times|\tau w|$  的结果的行数大于 1 时, 取每列的平均值。

(2) 计算直接关联矩阵  $A$ 。

$$A=(a_{ij})_{n\times n}=\begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

(12)

其中  $a_{ij}=\frac{\omega_i}{\omega_j}(\omega_j \text{ 则 } a_{ij}=0)$  表示因素  $i$  对因素  $j$  的影响程度。

式中: $a_{ii}$  表示因素  $i$  对因素  $i$  的影响程度。

(3) 归一化直接关联矩阵  $A$  得到直接影响矩阵  $G$ 。

$$G=(g_{ij})_{n\times n}=\frac{1}{\max_{1\leq i\leq n}\sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

(13)

(4) 计算综合影响矩阵  $T$ 。

$$T=G+G^2+\cdots+G^n$$

(14)

当  $n$  充分大, 可用  $G(I-G)^{-1}$  近似计算综合影响矩阵  $T$ , 其中  $I$  为单位矩阵,  $(I-G)^{-1}$  为  $I-G$  的逆矩阵。

(5) 计算影响度、被影响度、中心度以及原因度。

$$D_i=T_{i1}+T_{i2}+\cdots+T_{in}$$

(15)



$$P_i = T_{1i} + T_{2i} + \cdots + T_{ni} \tag{16}$$

$$R_i = D_i + P_i \tag{17}$$

$$C_i = D_i - P_i \tag{18}$$

式中: $D_i$  为影响度,表示因素  $i$  对其他因素的影响作用; $P_i$  被影响度,表示其他因素对因素  $i$  的影响作用; $R_i$  为中心度,其大小表示因素  $i$  影响作用的强弱,其值越大,影响作用越强,该因素越重要; $G_i$  为原因度,表示因素  $i$  与其他因素间的关联性,其值越大,关联性越强。原因度小于 0 称该因素为原因因素,表示对其他因素的影响更大;原因度大于 0 称该因素为结果因素,表示受其他因素的影响更大<sup>[18]</sup>。

2 结果与分析

2.1 生态安全评价结果与分析

利用熵权-TOPSIS 法计算得到 2011—2020 年黄河 9 个省域生态安全指数,结果详见表 2。整体来看,2011—2020 年黄河流域生态安全指数均值分别为

0.322,0.325,0.345,0.351,0.358,0.354,0.352,0.365,0.372 和 0.365,生态安全呈现缓慢上升态势,但整体水平不高,10 a 来生态安全指数均值在 0.3~0.4 徘徊。值得注意的是,在 2012 年后生态安全指数上升趋势极为明显,仅 2012—2013 年生态安全指数均值就上涨 0.02,这是由于“十八大”以来国家将黄河流域生态保护上升到国家战略的层次,黄河流域得到社会各界广泛的关注,生态安全文明建设迈入正轨。此外,在 2020 年略有下降,其原因是新冠疫情对各行各业不同程度的冲击。

综合分析可知,黄河流域各省域生态安全演变格局差异明显,山东、四川、内蒙古、河南和甘肃等省区呈现上升的发展态势,山西、陕西和青海省呈现波动态势,宁夏回族自治区呈现衰退态势。为了更好地诠释生态安全时序性变化,按照上升、波动、下降 3 种演变态势绘制 2011—2020 年黄河流域各省域生态安全概况图(图 4)。

表 2 黄河流域各省域 2011—2020 年生态安全指数

省 区	生态安全指数											
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	均值	排名
青 海	0.283	0.291	0.308	0.312	0.314	0.288	0.296	0.317	0.302	0.303	0.301	9
四 川	0.333	0.343	0.347	0.353	0.358	0.362	0.379	0.402	0.425	0.420	0.372	2
甘 肃	0.280	0.285	0.292	0.292	0.305	0.303	0.307	0.317	0.325	0.314	0.302	8
宁 夏	0.358	0.337	0.369	0.369	0.350	0.345	0.327	0.325	0.333	0.316	0.343	6
内 蒙 古	0.341	0.358	0.361	0.365	0.375	0.380	0.379	0.383	0.386	0.383	0.371	3
陕 西	0.286	0.285	0.330	0.336	0.337	0.338	0.327	0.331	0.351	0.338	0.326	7
山 西	0.346	0.353	0.368	0.386	0.372	0.354	0.311	0.330	0.335	0.338	0.349	5
河 南	0.307	0.315	0.326	0.336	0.359	0.363	0.381	0.407	0.423	0.407	0.362	4
山 东	0.365	0.358	0.405	0.411	0.451	0.456	0.461	0.474	0.470	0.462	0.431	1

生态安全呈上升态势的省域中,山东、四川和河南省上涨幅度极其明显,内蒙古和甘肃地区增长则较为缓慢。10 a 间山东、四川和河南省生态安全指数增幅高达 0.097,0.087 和 0.100(排名 2,3,1),均值位于第 1,2,4 名,生态安全水平高且发展迅猛。内蒙古自治区生态安全指数均值排名第 3,加之连年稳定上升的发展态势,生态安全获得长足进步。甘肃省生态基础薄弱,10 a 的生态安全均值排名仅为 0.302(排名第 8),但稳定上升的态势也表明其生态安全状况持续好转。

生态安全呈波动态势的省域中,山西省波动幅度最大,陕西省次之,青海省最为稳定。山西省生态安全指数在 2014 年达到顶峰(0.386),之后连年下降,2017 年降至最低点(0.311),2018—2020 年有所回升

但不明显,生态发展不稳定。陕西省 2012—2013 年生态安全指数突飞猛进,从 0.285 上升至 0.330,之后几年则稳定 0.327~0.353 区间内,生态发展面临瓶颈。青海省 10 a 来生态安全呈 M 形的演变态势,即“上升—下降—上升—下降”,生态安全指数位于 0.283~0.347,均值仅为 0.301(排名第 9),生态安全水平低且发展陷入僵局。

宁夏地区是黄河流域生态安全唯一呈现衰退态势的省域,2011 年生态安全指数为 0.358(当年排名第 2),2012 年大幅下降至 0.337(当年排名第 5),尽管在 2013 年迅速恢复至 0.369(当年排名第 2),但之后却连年下降,2011—2020 年降幅高达 0.042。尽管生态基础较好,但持续性的衰退态势也表明宁夏地区面临着生态退化等问题,须及时调控治理策略。

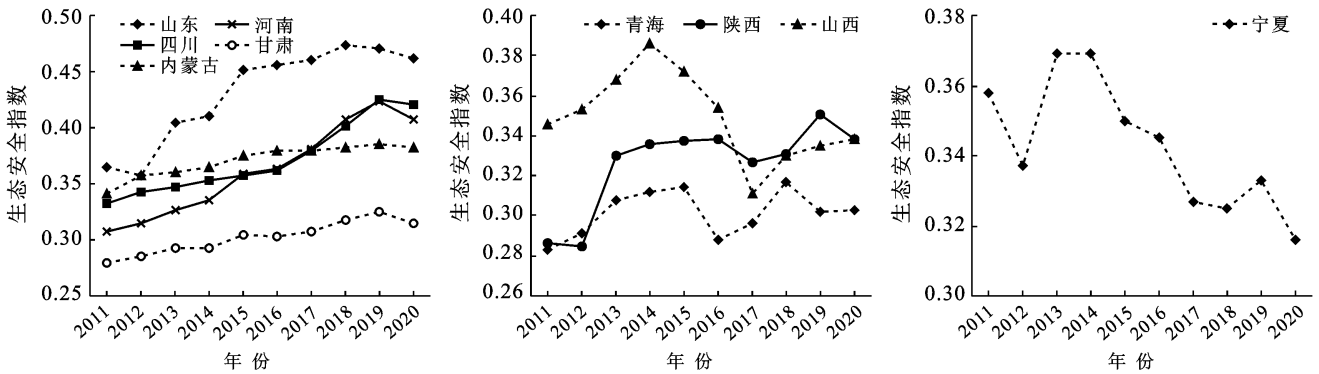


图 4 黄河流域各省域 2011—2020 年生态安全概况

2.2 影响因素分析

将驱动力( $D$ )、压力( $P$ )、状态( $S$ )、影响( $I$ )及响应( $R$ )5 个指标层的 24 个指标作为输入层,以黄河流域各省域 10 a 的生态安全指数作为输出层,构建 BP 神经网络模型。其隐含层个数为 24,设置 $[-0.5,+0.5]$

的随机数作为初始权重,Sigmoid(激励函数)设为 0.9;网络训练速度(步长)为 0.1,最大迭代次数为 10 000,允许的拟合误差为 0.001,最终计算得到黄河流域生态安全影响因素的中心度( $R$ )和原因度( $C$ )<sup>[20-21]</sup>,结果详见表 3。

表 3 黄河流域 9 省区中心度( $R$ )和原因度( $C$ )

指标	青海		四川		甘肃		宁夏		内蒙古		陕西		山西		河南		山东	
	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$	$R$	$C$
$F_1$	6.318	0.474	5.492	0.047	6.734	-1.509	0.965	-0.008	3.164	0.136	6.646	-0.695	7.976	1.016	3.158	-0.322	6.206	0.288
$F_2$	6.362	-0.891	5.587	-1.029	6.585	0.527	0.968	1.291	3.213	-0.578	6.997	-2.307	8.007	-1.241	3.142	-0.013	6.383	1.528
$F_3$	6.300	-0.035	5.494	0.158	6.565	-0.097	0.965	0.066	3.376	1.195	6.704	1.128	7.917	-0.296	3.210	-0.663	6.208	0.322
$F_4$	6.321	0.522	5.730	1.643	6.598	-0.667	0.967	0.078	3.242	0.726	6.769	-1.468	7.912	-0.102	3.144	0.099	6.201	-0.130
$F_5$	6.694	-2.275	5.503	0.346	6.689	1.294	0.968	-0.158	3.163	-0.096	6.646	0.691	7.940	-0.677	3.189	0.549	6.289	-1.063
$F_6$	6.338	0.700	5.528	0.631	6.721	1.453	0.977	-0.225	3.162	-0.057	6.945	-2.140	7.922	0.420	3.199	-0.605	6.256	-0.842
$F_7$	6.355	-0.837	5.519	0.549	6.569	-0.248	0.990	-0.087	3.290	-0.917	6.699	1.093	7.958	0.861	3.142	-0.041	6.209	0.346
$F_8$	6.340	0.718	5.501	-0.323	6.593	-0.617	1.040	-0.102	3.309	-0.983	6.610	0.024	7.933	-0.587	3.208	-0.651	6.265	-0.911
$F_9$	6.337	0.688	5.509	-0.437	6.657	1.113	0.970	-0.425	3.270	0.841	6.628	0.499	7.967	-0.941	3.183	0.515	6.345	1.359
$F_{10}$	6.300	0.076	5.592	-1.057	6.570	0.274	1.052	-0.187	3.600	-1.736	6.782	1.525	7.938	-0.657	3.359	-1.196	6.384	-1.530
$F_{11}$	6.326	0.572	5.502	-0.338	6.573	-0.351	0.982	0.262	3.164	0.125	6.645	0.684	7.911	-0.012	3.142	-0.028	6.201	-0.156
$F_{12}$	6.318	-0.481	5.642	-1.298	6.603	0.722	1.398	0.305	3.214	-0.586	6.614	0.242	7.912	-0.121	3.151	-0.238	6.211	-0.376
$F_{13}$	6.368	0.932	5.622	1.208	6.630	0.935	1.010	-0.395	3.162	0.000	6.613	-0.192	7.978	1.034	3.162	-0.360	6.201	-0.153
$F_{14}$	6.339	0.710	5.510	0.454	6.565	0.079	1.301	-0.038	3.162	0.063	6.610	-0.045	8.006	1.232	3.159	0.329	6.299	-1.120
$F_{15}$	6.366	0.922	5.529	0.639	6.568	-0.220	0.965	-0.243	3.170	0.238	6.645	-0.685	7.917	0.306	3.146	0.152	6.202	0.189
$F_{16}$	6.390	-1.075	5.495	-0.198	6.575	0.380	0.994	-0.036	3.395	1.246	6.648	-0.719	8.042	1.449	3.219	-0.705	6.255	-0.836
$F_{17}$	6.512	1.659	5.517	0.528	6.686	-1.276	0.965	0.167	3.169	-0.214	6.617	0.314	7.929	0.534	3.167	-0.403	6.215	0.447
$F_{18}$	6.359	-0.870	5.624	-1.220	6.587	-0.555	0.979	0.384	3.504	1.522	6.810	1.648	7.922	0.414	3.418	1.357	6.204	0.233
$F_{19}$	6.301	0.091	5.499	0.278	6.771	1.669	1.036	0.042	3.178	0.325	6.703	1.119	7.933	-0.594	3.153	-0.268	6.269	0.937
$F_{20}$	6.391	-1.082	5.759	-1.743	6.631	-0.945	0.965	-0.035	3.175	-0.292	6.661	-0.825	8.065	-1.574	3.186	0.531	6.244	0.752
$F_{21}$	6.495	-1.589	5.492	-0.006	6.617	-0.838	0.996	-0.252	3.201	0.506	6.798	1.596	8.090	1.697	3.198	0.600	6.415	1.658
$F_{22}$	6.338	0.696	5.550	0.805	6.568	-0.233	0.986	-0.209	3.221	-0.621	6.624	-0.432	8.137	-1.909	3.158	-0.315	6.201	-0.149
$F_{23}$	6.307	0.292	5.507	0.403	6.744	-1.555	0.970	-0.108	3.295	-0.935	6.614	0.240	7.997	-1.169	3.494	1.539	6.252	0.813
$F_{24}$	6.300	0.082	5.492	-0.040	6.597	0.666	0.969	-0.089	3.163	0.092	6.734	-1.293	7.964	0.917	3.145	0.138	6.402	-1.605

传统 DEMATEL 将影响因素分为原因型和结果型,又称为驱动型和特征型,驱动型因素是系统发生变化的根本原因,特征型因素是系统的直接表象<sup>[18,21]</sup>。

研究发现,少数因素的中心度远大于其他因素,表现出明显的重要性,参考已有研究<sup>[18,20-21]</sup>,将所有因素中心度的平均值和标准差之和作为阈值 $\theta$ ,中心度大于 $\theta$ 称为强驱动型因素和强特征型因素<sup>[18,21]</sup>。其

中,强驱动型因素通常具备较高的中心度和原因度,表明在系统中重要程度高且对于其他因素的影响作用强,因此强驱动型因素为影响生态安全的关键因素,对于生态安全的发展起着举足轻重的作用<sup>[18,20]</sup>。将表 3 中各省域的中心度平均值和标准差相加得到阈值  $\theta$ ,最终获取各省域关键因素(表 4)。

表 4 黄河流域 9 省区关键因素

省 域	演变态势	阈值 $\theta$	关键因素(强驱动型因素)	所属指标层
山 东	上升	6.335	$F_2, F_9, F_{21}$	状态、驱动力、响应
四 川	上升	5.626	$F_{21}$	响应
河 南	上升	3.293	$F_{18}, F_{23}$	影响、响应
内 蒙 古	上升	3.365	$F_4, F_{16}, F_{18}$	状态、影响、影响
甘 肃	上升	6.690	$F_6, F_{19}$	影响、驱动力
山 西	波动	8.031	$F_{16}, F_{21}$	影响、响应
陕 西	波动	6.804	$F_{18}$	影响
青 海	波动	6.454	$F_{17}$	影响
宁 夏	衰退	1.123	$F_{14}, F_{12}$	压力

由表 4 可知,生态安全关键因素所处指标层与演变态势有明显关联性。生态安全水平不断上升的省域关键因素分散在压力指标层外,生态压力较小使得该类地区可以集聚资源推动生态文明建设;呈波动态势的省域关键因素集中分布在影响指标层,人类活动造成的生态影响使得该类地区生态环境不稳定,从而导致生态安全水平忽高忽低;持续衰退的省域关键因素集中于压力指标层,减轻压力是遏制生态持续恶化的关键路径。为探析关键因素作用机理,截取 2011—2020 年黄河流域九省关键因素原始数据(表 5)。

表 5 黄河流域 9 省区 2011—2020 年关键因素数据

省 域	关键因素	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
山 东	人均公园绿地面积/ $\text{m}^2$	16,000	16,370	16,812	17,100	17,360	17,910	17,840	17,640	17,572	17,675
	人均可支配收入(元/人)	17 792	18 755	19 008	20 864	22 703	24 685	26 930	29 205	31 597	32 886
	工业固废综合利用率/%	93.7	93.1	94.3	95.7	92.5	84.3	79.5	77.1	80.5	84.3
四 川	工业固废综合利用率/%	47.1	45.7	41.0	42.8	44.3	38.5	39.1	38.7	38.0	37.2
河 南	可吸入颗粒物平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	103	105	171	158	167	143	118	106	99	84
	节能环保财政支出/亿元	95.600	109.453	111.923	119.945	177.770	195.720	241.648	358.701	352.287	272.628
	空气质量优良率/%	95.1	95.3	58.4	65.8	75.6	77.5	69.9	74.5	89.6	90.8
内 蒙 古	人均耕地面积( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	4.320	5.487	5.478	5.482	5.473	5.511	5.499	5.489	5.476	5.470
	可吸入颗粒物平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	76	91	146	122	103	95	95	86	71	71
	人均 GDP/元	19 595	21 978	24 296	26 433	26 165	27 643	28 497	31 336	32 995	35 995
甘 肃	建成区绿化覆盖率/%	27.9	30.0	32.1	30.8	30.2	31.5	33.3	33.5	36.0	36.3
	人均耕地面积( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	1.697	1.688	1.678	1.668	1.662	1.653	1.644	1.636	1.646	1.642
	工业固废综合利用率/%	57.500	69.400	64.600	65.100	55.300	48.300	35.500	38.100	40.500	41.700
陕 西	可吸入颗粒物平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	118	118	189	152	126	137	126	111	96	88
青 海	第三产业比例/%	32.3	33.0	32.8	37.0	41.4	42.8	46.6	47.1	50.7	50.8
宁 夏	单位 GDP 废水排放量( $\text{t}/\text{万元}$ )	12.746	11.616	10.345	9.986	9.790	10.603	10.330	9.809	9.035	9.145
	人均用水量( $\text{m}^3/\text{人}$ )	549.200	480.260	489.975	453.828	457.396	447.079	433.082	434.638	432.700	410.820

根据表 4—5 可知:①山东省生态安全关键因素为人均公园绿地面积( $F_2$ )、人均可支配收入( $F_9$ )和工业固废综合利用率( $F_{21}$ )。其中,人均公园绿地面积增幅位于黄河流域首位,城市绿化建设持续向好发展,但人均可支配收入低(10 a 均值仅为 24 431 元)、工业固废综合利用率逐年下降(2014 年 95.7%,2018 年 77.1%),经济发展不协调以及工业污染加剧限制了山东生态安全水平的提升速度,并于 2018 年开始下降。②四川省的关键因素为工业固废综合利用率( $F_{21}$ ),其 10 a 均值仅为 41.3%,远低于黄河流域均值



(52.4%),加之四川省位处黄河流域和长江流域交汇地,且处于上游地区,工业二次污染极大地削弱了环境质量,并对下游地区生态产生严重影响,应及时进行调控。③河南省的关键因素为可吸入颗粒物平均浓度( $F_{18}$ )和节能环保支出( $F_{23}$ )。10 a 来,河南省不断加大节能环保支出(2011 年 95.632 亿元,2018 年 358.701 亿元),生态建设发展迅速,加之对农作物焚烧、工业废气排放等空气污染的严格管控,可吸入颗粒物平均浓度连年降低(2015 年  $169\text{ mg/m}^3$ ,2020 年  $84\text{ mg/m}^3$ ),空气质量逐步好转,生态环境状况趋于良性。④内蒙古自治区的关键因素为空气优良率( $F_4$ )、人均耕地面积( $F_{16}$ )和可吸入颗粒物平均浓度( $F_{18}$ )。内蒙古产业结构以第三产业为主,空气优良率和可吸入颗粒物浓度均处在极为良好的区间,加之幅员辽阔,人均耕地面积常年位于全国的 3 倍左右,是我国重要的农业生产基地,为生态安全水平稳步提升奠定基础。⑤甘肃省的关键因素为人均 GDP( $F_6$ )和建成区绿化覆盖率( $F_{19}$ )。甘肃省是我国经济最落后的省域,2020 年人均 GDP 仅为 36 038 元,且城市绿化建设水平低,2020 年建成区绿化覆盖率仅为 36.3% (黄河流域均值 37.2%),使得整体生态安全水平较低。但值得注意的是这两个指标数据 10 a 来呈现不断上升的态势,这也是甘肃省生态安全不断转好的主要原因。⑥山西省的关键因素为人均耕地面积( $F_{16}$ )和工业固废综合利用率( $F_{21}$ )。山西省的支柱产业是煤炭行业,而煤矿过度开发必然损害耕地的质量和数量,同时工业主导的产业结构会产生大量工业废物,而连年下降的工业固废综合利用率(2014 年 65.1%,2018 年 35.5%)也表明工业污染的加剧,生态安全状况从 2014 年开始急剧恶化。⑦陕西省的关键因素为可吸入颗粒物浓度( $F_{18}$ )。陕西省呈现明显的大陆性季风气候,从西伯利亚过来的季风被秦岭截断,加之陕北的重工业生产,使得空气中可吸入颗粒物浓度居高不下,常年在  $100\text{ mg/m}^3$  左右徘徊,导致沙尘暴、雾霾等空气灾害频繁发生,造成严重的环境污染。⑧青海省的关键因素为第三产业占比( $F_{17}$ )。“十三五”以来,青海省将加快服务业发展作为结构优化战略重点,第三产业发展迅猛,占比由 2011 年 32.3% 增长至 2020 年的 50.8%,这也导致 2011—2015 年生态安全水平不断提高,但人均可支配收入无明显变化,居民消费能力与产业发展不匹配,从而导致生态文明建设陷入僵局。⑨宁夏回族自治区的关键因素为单位 GDP 废水排放量( $F_{12}$ )和人均用水量( $F_{14}$ )。作为水资源最为匮乏的省域,宁夏地区的人均用水量却居高不下(宁夏均值  $1\,035.913\text{ m}^3/\text{人}$ ,黄河流域均值

$459.607\text{ m}^3/\text{人}$ ),尽管随着对排污权的改革以及工业污染管控升级,单位 GDP 废水排放量连年下降,但水资源的不合理利用仍使得生态安全水平持续衰退。

## 3 讨论与结论

### 3.1 结论

(1) 黄河流域整体生态安全水平较低但呈现缓慢上升的发展态势,生态环境状况持续好转。黄河流域各省域 10 a 的生态安全指数均值从高到低依次为:山东、四川、内蒙古、河南、山西、宁夏、陕西、甘肃和青海省。各省域生态安全演变格局差异明显,山东、四川、内蒙古、河南和甘肃等省域生态安全水平持续上升,生态环境质量稳步提升;山西、陕西和青海省生态安全状况存在波动,生态文明建设陷入僵局;宁夏回族自治区生态安全水平持续衰退,面临生态退化风险。

(2) BP-DEMATEL 模型结果表明,黄河流域各省域均存在影响生态安全的关键因素,但并不趋同,生态安全水平呈上升态势的省域关键因素分散在压力指标层外,生态压力对该区域生态安全影响较小;呈波动态势的省域关键因素集中于影响指标层,人类活动对生态环境造成的影响使得该区域生态安全陷入波动;呈衰退态势的省域(宁夏)关键因素分布在压力指标层,生态压力带来的冲击使得该区域生态安全水平不断下降。

### 3.2 讨论

(1) 针对生态安全呈上升态势的省域,应夯实生态基础,以关键因素为抓手,谋求进一步发展。山东省应扩大向民资开放领域,增加就业,同时打造合理分配机制,提升人均可支配收入,此外革新工业废物处理技术,减少工业污染。四川省应对工业污染实施严格管控,同时发挥生态核心区带动作用,推动周边地区(青海、甘肃省等)生态向好发展。河南省应保持现有的空气污染管理机制,在财政允许的范围内加大对生态文明建设的投入。内蒙古自治区应严格实施耕地管制,防止耕地不合理占用,同时加强对空气治理的精细化程度,保障空气质量。甘肃省应合理吸收周边省域的资源辐射,进一步推动城市绿化建设。

(2) 针对生态安全呈波动态势的省域,应集聚资源发展生态文明建设,打破僵局。山西省应进行生态修复,恢复被工业破坏的耕地,同时加快产业转型,减少工业污染。陕西省建立健全空气灾害预警、防控机制,着力于提升空气质量。青海省应减缓第三产业发展速度,注重提升基础设施建设。

(3) 针对生态安全呈衰退态势的省域,应回溯自身,梳理关键因素相关产业的发展脉络,及时采取管

控措施,止住下降颓势。宁夏回族自治区应充分考虑用水需求,制定合理的用水定额,同时加强对工业废水的管控,建立合理利用水资源的节水型社会。

综上所述,本文将熵权-TOPSIS 模型和 BP-DEMATEL模型相结合,构造“现状评价—因素分析”的研究模式,丰富了现有的生态安全研究框架,且研究结果贴合黄河流域实际状况,对黄河流域高质量发展具有一定推动作用。但限于篇幅与数据可得性等因素存在以下不足:一是研究尺度过大,未从微观角度(市域或县域)补充黄河流域生态安全相关研究;二是未能进一步探讨黄河流域空间关联特征与演绎规律(上、中、下游),未来有待进一步探析。

[参 考 文 献]

[1] Rapport D J, Hildén M. An evolving role for ecological indicators: From documenting ecological conditions to monitoring drivers and policy responses [J]. Ecological Indicators, 2013,28(4):10-15.

[2] Gerten D, Rockström J, Heinke J, et al. Response to Comment on “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet” [J]. Science, 2015, 348(6240):1217-1217.

[3] 向丽,周伟,任君,等.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价:以湟水流域西宁段为例[J].生态学杂志, 2022,41(10):2064-2071.

[4] Pirages D C, DeGeest T M. Ecological Security: An Evolutionary Perspective on Globalization [M]. Lanham: Rowman & Littlefield Publishers, 2003.

[5] Jogo W, Hassan R. Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: The case of the Limpopo wetland in southern Africa [J]. Ecological Economics, 2010,69(7):1569-1579.

[6] 庞雅颂,王琳.区域生态安全评价方法综述[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):340-344.

[7] 吴艳霞,罗恒,梁志康.长江经济带生态安全测度研究[J].生态学报,2020,40(19):6761-6775.

[8] 王文萱,李明孝.基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时

空变化[J].生态学杂志,2020,39(8):2724-2736.

[9] 崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1): 302-319.

[10] 张继权,伊坤朋,王秀峰,等.基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价[J].应用生态学报,2011,22(1):189-195.

[11] 杨振龙,左其亭,姜龙,等.黄河流域九省区城镇化与生态安全交互作用机制[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):191-200.

[12] 马荣,孙艳红.基于 DPSIR 框架的黄河流域旅游生态安全动态评价研究[J].生态经济,2021,37(4):145-151.

[13] 杨光明,陈也,张帆,等.基于 PSR 模型的三峡库区生态安全评价及动态预警研究[J].生态经济,2021,37(4): 209-214.

[14] 文高辉,袁泉,赵懿.2017 年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2021,41(2): 178-187.

[15] 刘艳芳,安睿,曲胜秋,等.福建省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J/OL].中国农业资源与区划: 1-15 [2022-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220107.1102.025.html>.

[16] 袁媛,白中科,师学义,等.基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定:以河北省遵化市为例[J].生态学杂志,2022,41(4):750-759.

[17] 杨玄酯,罗巍,唐震.生态位视角下长江经济带科技创新竞争力评价及演化[J].软科学,2019,33(7):8-14.

[18] 崔强,武春友,匡海波.BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用[J].系统工程理论与实践,2013, 33(6):1471-1478.

[19] 任瑞,李雪梅,李兰海,等.中国天山山区降水形态转变的驱动因子辨析[J].干旱区资源与环境,2020,34(3): 112-117.

[20] 秦晓楠,卢小丽.基于 BP-DEMATEL 模型的沿海城市生态安全系统影响因素研究[J].管理评论,2015,27 (5):48-58.

[21] 张秋,朱翠华.基于 BP-DEMATEL 模型的我国直辖市创业环境影响因素研究[J].工业技术经济,2018,37 (10):67-74.