

DOI: 10.5846/stxb202102030359

赵敏敏,何志斌,蔺鹏飞,韩双宝,王思源.基于压力-状态-响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价.生态学报,2021,41(22):9039-9049.

Zhao M M, He Z B, Lin P F, Han S B, Wang S Y. Ecological security evaluation of Zhangye City in the middle reaches of the Heihe River based on Pressure-State-Response model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9039-9049.

# 基于压力-状态-响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价

赵敏敏<sup>1</sup>, 何志斌<sup>2</sup>, 蔺鹏飞<sup>2</sup>, 韩双宝<sup>1</sup>, 王思源<sup>1,\*</sup>

1 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051

2 中国科学院西北生态环境资源研究院中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000

**摘要:**生态系统服务的状态与生态是否安全密切相关,生态系统服务的正常发挥是实现生态安全的前提。近年来,中国西北荒漠-绿洲扩张速度加快,改变了生态系统服务的供给与传输,进而影响了区域生态安全。以典型荒漠-绿洲区域黑河中游的张掖市为例,基于压力-状态-响应模型,耦合生态系统服务理论,构建了黑河中游生态安全评价指标体系,评估了2001—2015年黑河中游生态安全演变趋势。研究结果表明黑河中游生态系统面临的资源消耗和环境污染压力越来越大,压力指数有所降低;部分地区出现植被退化、破碎化增加等现象,状态指数略有降低;在实施节水灌溉、产业转移、湿地保护等举措后,响应指数显著增加。总体来看,2001—2015年黑河中游生态安全水平呈现波动增长趋势,生态安全综合指数由0.3748增至0.5888,生态安全等级由“较不安全”达到“临界安全”状态,其中高效节水灌溉面积、生态用水量、地下水开采率等水资源相关要素是影响绿洲生态安全水平的主要因子。基于以上研究,提出了坚持生态保护优先、调整种植和产业结构、发展高效节水灌溉技术、提高公众生态保护意识等提高生态安全水平的相关对策与建议,以期为促进区域生态经济可持续发展提供支撑。

**关键词:**黑河中游;压力-状态-响应模型;生态安全;生态系统服务

## Ecological security evaluation of Zhangye City in the middle reaches of the Heihe River based on Pressure-State-Response model

ZHAO Minmin<sup>1</sup>, HE Zhibin<sup>2</sup>, LIN Pengfei<sup>2</sup>, HAN Shuangbao<sup>1</sup>, WANG Siyuan<sup>1,\*</sup>

1 Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China

2 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** The state of ecosystem services is closely related to whether the ecosystem is safe or not. The normal play of ecosystem services is the premise of realizing ecological security. Recently, the expansion speed of desert oasis in Northwest China has accelerated which has changed the supply and transmission of ecosystem services, and further affected the regional ecological security. Taking the middle reaches of the Heihe River in typical desert oasis region as an example, based on Pressure-State-Response model, coupled with the ecosystem service theory, the ecological security evaluation index system of the middle reaches of the Heihe River was constructed, and the evolution trend of ecological security in the middle reaches of the Heihe River from 2001 to 2015 was evaluated. The results showed that the ecosystem in the middle reaches of the Heihe River was facing increasing pressure of resource consumption and environmental pollution, and the pressure index decreased accordingly. As vegetation degradation and fragmentation increased in some areas, the state index

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504306);中国地质调查局地质调查项目(DD20190333)

收稿日期:2021-02-03; 接收日期:2021-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangsiyuan@mail.cgs.gov.cn

decreased slightly. After the implementation of water-saving irrigation, industrial transfer, wetland protection and other positive measures, the response index increased significantly. Overall, from 2001 to 2015, the ecological security level in the middle reaches of the Heihe River showed a fluctuating growth trend, the ecological security index increased from 0.3748 to 0.5888, and the ecological security level reached the state of "critical safe" from "less safe". Among them, water resources related factors such as area of efficient water-saving irrigation, ecological water consumption and groundwater development rate were the main factors affecting the ecological security level of oasis. Based on the above research, this paper puts forward relevant countermeasures and suggestions to improve the ecological security level, such as adhering to the priority of ecological protection, adjusting planting and industrial structure, developing efficient water-saving irrigation technology and improving public awareness of ecological protection, in order to provide support for promoting the sustainable development of regional ecological economy.

**Key Words:** the middle reaches of the Heihe River; Pressure-State-Response model; ecological security; ecosystem service

生态安全这一思想最早出现于 20 世纪 40 年代的土地功能与土地健康评价当中,其概念构筑在环境安全的理论基础之上<sup>[1]</sup>。1989 年国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IASA)在阐释全球生态环境问题时首次提出“生态安全”这一概念<sup>[2]</sup>。随着生态安全理论框架的日趋成熟,这一概念愈加明确:生态安全指一个区域内维持人类生存与发展所需的生态系统服务处于少受甚至不受威胁的状态,使生态环境既能满足人类与生物群落生存与发展的需要,又能保证生态环境本身的生态过程不受损害,使其与社会经济处在可持续发展的状态<sup>[3]</sup>。由此可见,生态系统服务与生态安全有着紧密联系,将生态系统服务与生态安全相结合,有助于为生态环境管理提供依据<sup>[4]</sup>。

传统的生态安全评价研究一般从生态系统的结构和功能角度去构建指标体系,而将人类视为外部要素不加以考虑<sup>[5]</sup>。然而在现实情况中,人类早已成为生态安全格局中不可或缺的部分<sup>[6]</sup>。基于以上情形,生态系统服务成为耦合人类与其周围生物与非生物环境的有效纽带,生态系统服务的可持续性成为人类直观感知生态是否安全的直接途径<sup>[7-9]</sup>。因此,生态系统服务理论的融入为生态安全评估提供了正向的工具,将人类对生态系统服务的需求与生态系统所能提供相应服务的能力进行耦合,成为目前生态安全评价中的新视角<sup>[10-11]</sup>。

基于生态系统服务理论构建生态安全评价指标体系应同时考虑生态系统正常运行与人类社会的可持续发展<sup>[3]</sup>。彭保发等<sup>[10]</sup>通过辨识生态系统服务的供给水平与需求热点,综合考虑生态系统服务的传输网络,基于压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型<sup>[12-13]</sup>构建了耦合生态系统服务的生态安全评价机制。在该机制中,人类活动作为驱动因子,对生态系统服务的获取强度对生态系统造成压力,改变了生态系统的结构与功能,生态系统服务的传输能力也受到影响,最终生态系统服务流量对此作出响应。该框架能够评价生态系统服务传输网络的流量、稳定性与可持续性,有助于揭示人类活动和生态安全之间的相互作用,可以作为生态安全评价的基本框架。

黑河流域是中国第二大内陆河流域,随着经济社会的快速发展,黑河中游绿洲的耕地和建设用地不断扩张,相应的林地、草地不断萎缩<sup>[14-15]</sup>。黑河中游的绿洲扩张影响了生态系统服务的供给与传输,进一步影响了区域的生态安全格局。针对黑河中游的绿洲扩张情景,基于耦合生态系统服务理论的 PSR 模型框架<sup>[10]</sup>,构建了黑河中游生态安全评价指标体系,评估区域生态安全变化,为制定生态管理策略、支撑生态管理权衡与决策等提供了支撑<sup>[16]</sup>。

## 1 研究区概况

本文拟选择典型荒漠-绿洲黑河中游为研究区,黑河中游位于河西走廊中段,南部为祁连山脉,北部紧邻

合黎、龙首两山脉(97°20′—102°12′ E, 38°28′—39°50′ N), 主要包括甘肃省张掖市的甘州区、高台县及临泽县(图 1)。本区域海拔介于 1252—3609 m 之间, 大部分属于黑河的山前冲洪积扇, 水分条件相对较好, 形成了独特的荒漠-绿洲景观。黑河中游受大陆性气候和青藏高原的共同影响, 属中温带甘-蒙气候区, 年平均气温介于 -1.1—9.5 °C 之间。由于远离水汽输送通道, 该处大部分地区年均降水量小于 200 mm, 年均蒸发量超过 1600 mm。黑河中游紧邻荒漠, 土壤类型以荒漠土与灰漠土为主(主要分布在绿洲和荒漠过渡地带)。黑河中游生长的天然植被主要为耐旱、耐盐碱的乔木、小灌木与半灌木等。中游绿洲农业区则具有显著的人工绿洲特征, 植被以人工灌溉栽培农作物和防风沙的行道林木等为主。该区域长期受到人类生产生活的影响和改造, 区域生态安全、用水调配和环境保护等关乎国计民生的问题始终较为突出。作为我国生态环境比较脆弱的地区之一, 黑河中游成为诸多学者关注的焦点区域<sup>[17]</sup>。

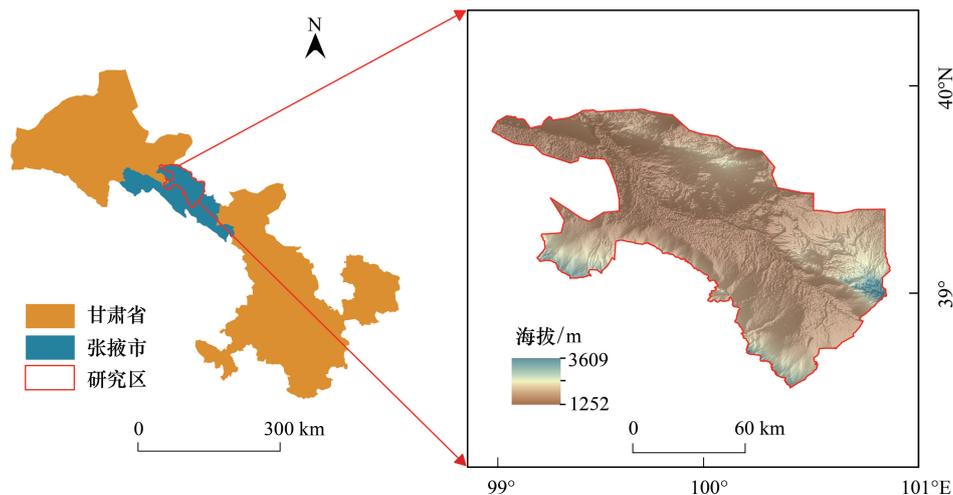


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 生态安全评价方法

构建 PSR 指标体系。PSR 模型包括目标层、准则层与指标层 3 个部分: 目标层即为区域生态安全, 准则层包括压力、状态及响应 3 个部分, 指标层则为指标体系中的各个具体指标。在参考相关研究<sup>[10,18-20]</sup>的基础上, 基于生态系统服务理论构建了黑河中游生态安全 PSR 指标体系: 压力指标表示生态环境出现问题的原因, 侧重描述外界对生态系统的干扰及人类对生态系统服务的获取强度<sup>[10]</sup>, 例如伴随着经济发展对地下水等资源的过度消耗所导致的生态退化问题, 本文从社会发展、环境污染、资源消耗等方面展开指标遴选: 其中社会发展侧重于描述人口增长及经济发展对生态系统所产生的压力, 环境污染侧重于描述农业生产活动对生态系统所造成的污染, 资源消耗侧重于描述区域生产生活对水资源的消耗程度; 状态指标主要表示在各种压力状态下, 生态系统当前的结构与功能, 如景观指数、景观类型等所发生的变化; 响应指标则主要表示经济系统、社会系统及生态系统所采取的应对生态环境变化的具体措施: 其中经济系统侧重描述通过增加第三产业比重从而减少资源需求等措施, 社会系统描述政府及农户采取节水灌溉、转移劳动力等降低资源消耗的措施, 生态系统则根据生态系统服务价值变化反映生态系统的响应状况。同时依据科学性、可操作性、代表性、全面性及可比性等原则, 构建了 PSR 指标体系(图 2)。

指标无量纲化。由于各个指标量级不同, 因此本文采用极差标准化方法<sup>[19]</sup>对指标进行无量纲化处理, 对

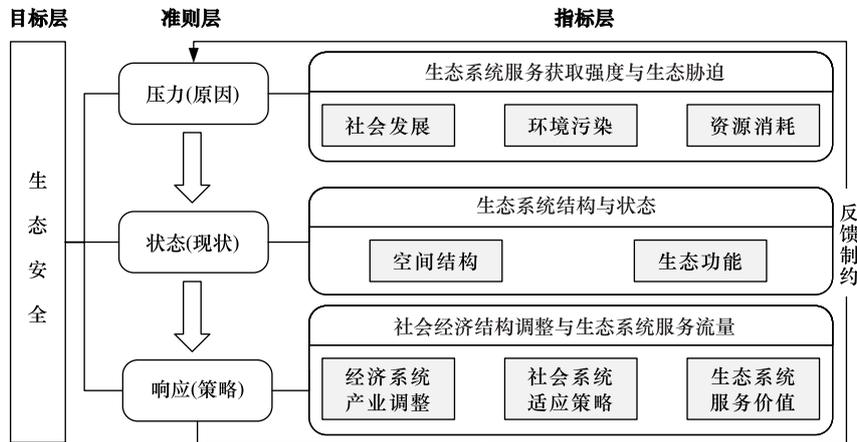


图 2 基于生态系统服务理论的压力-状态-响应框架

Fig.2 Pressure-State-Response framework based on ecosystem services theory

于正向指标:

$$X_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \tag{1}$$

对于负向指标:

$$X_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \tag{2}$$

式中,  $X_{ij}$  为指标标准化值;  $x_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  个指标的值;  $\max x_j$  与  $\min x_j$  为第  $j$  个指标的最大值和最小值。

确定指标权重。指标赋权是生态安全评价中的重要内容, 指标赋权法包括主观赋权法与客观赋权法, 其中熵值法是一种常用的客观赋权法。熵是一种对不确定性的定量, 信息量越大, 不确定性越小, 熵值也越小。一般而言, 指标离散程度高, 熵值就大, 反之亦然。本文采用熵权法<sup>[21]</sup>对指标权重进行赋值, 通过计算各个指标的特征比重、熵值, 进而确定各指标权重:

$$S_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^m X_{ij} \tag{3}$$

$$e_j = - (1/\ln m) / \sum_{i=1}^m S_{ij} \ln (S_{ij}) \tag{4}$$

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \tag{5}$$

式中,  $m$  为研究期;  $n$  为指标个数;  $S_{ij}$  为指标的特征比重;  $e_j$  为指标熵值;  $w_j$  为指标权重。

计算生态安全指数。生态安全指数表征研究区在压力、状态、响应方面的生态安全水平, 指数越高, 则生态安全水平越高, 本文采用综合指数法计算生态安全指数, 计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$ESI_i = \sum_{i=1}^m X_{ij} \times w_j \tag{6}$$

$$ESI = \sum_{i=1}^3 ESI_i \tag{7}$$

式中,  $ESI_i$  为 P(压力)、S(状态)、R(响应) 3 个层次的生态安全指数;  $ESI$  为生态安全综合指数;  $X_{ij}$  为指标标准化值;  $w_j$  为第  $j$  项指标权重。

障碍因子识别。障碍度模型可以识别出对生态安全产生障碍的主要影响因子, 障碍度计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$F_i = w_i \times (1 - X_i) \tag{8}$$

式中,  $F_i$  为指标的障碍度,  $w_i$  为指标的权重,  $X_i$  为指标的标准化值。

### 2.1.2 其他评价方法

景观格局指数。景观格局指数是计算生态安全指数的重要指标, 选取景观破碎度和景观多样性指标衡量

生态系统状态,计算公式如下<sup>[22-24]</sup>:

$$C = N/A \quad (9)$$

式中, $C$  为景观破碎度, $N$  为斑块数; $A$  为总面积。

$$H = - \sum_{i=1}^m (P_i) \times (\ln P_i) \quad (10)$$

式中, $H$  为景观多样性, $P_i$  为景观类型  $i$  所占面积的比例, $m$  为景观类型总数。

生态系统服务价值核算方法。采用效益转移法<sup>[25]</sup> 评估生态系统服务价值,该方法通过定义每种土地利用/覆盖类型所对应的单位面积生态系统服务价值,并将其分别乘以每种土地利用/覆盖的面积来估算生态系统服务价值。由于该方法不是所用到的主要方法,因此不对其加以展开,具体方法见谢高地等<sup>[25]</sup> 的文章(已根据研究区气候、经济等实际情况,对谢高地等<sup>[25]</sup> 提出的中国单位面积生态系统服务价值当量进行了区域校正)。

## 2.2 数据来源

### 2.2.1 农户调查数据

基于参与式农村评估法,对黑河中游干流流经区域(张掖市甘州区、临泽县及高台县)进行了半结构式农户问卷调查。首先于 2018 年 7 月对 3 个区县的节水政策进行了初步了解,并对农户的生计方式及对节水政策的感知进行了初步调查,在此基础上明确了问卷调查的主体内容。2018 年 10 月开展了张掖市甘州区、临泽县及高台县农户对节水政策的适应与感知调查,问卷主要通过对比节水政策前后生计策略的转变分析农户对节水政策的适应策略,并通过农户对节水政策的感知调查评估现行政策的合理性,为下一步政策的改进提供借鉴。正式调研覆盖 3 个区、县共计 77 个行政村(图 3),取得问卷 276 份,其中包含有效问卷 259 份。通过将有效问卷输入 Excel 中实现问卷数据电子化,运用 SPSS 等软件对数据进行了统计与分析,遴选出生态安全评价所需指标,并为生态安全对策与建议的提出提供了基础。

### 2.2.2 其他数据

气象数据、土壤保持数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;经济数据来源于 2001—2015 年张掖市统计年鉴、全国农产品成本收益资料汇编等;水利数据主要来源于甘肃省水资源公报;土地利用数据来自地理国情监测云平台;中国单位面积生态系统服务价值当量来自谢高地等<sup>[25]</sup> 的文章。

## 3 结果与分析

### 3.1 黑河中游生态安全评价指标体系构建

水资源是维系黑河中游绿洲生态系统稳定与社会经济发展的命脉,水分充足则绿洲扩张,水分短缺则绿洲萎缩,总之水资源的数量与质量决定了绿洲规模的大小<sup>[26-27]</sup>。其次,土壤是农业活动的基石,虽然黑河流域拥有广袤的土地面积,但是土地沙化、土壤质量退化等问题突出,直接影响了土地生产力水平,限制了干旱区人类生存空间的拓展<sup>[28]</sup>。因此,黑河中游水土资源的演变对区域生态安全维持有至关重要的作用,本文即以水土资源为侧重点,构建了黑河中游生态安全评价指标体系:由于中游人类活动频繁,因此压力系统主要考虑社会发展、环境污染及资源消耗所产生的压力;状态指标仍侧重描述生态系统当前的结构与功能;响应指标

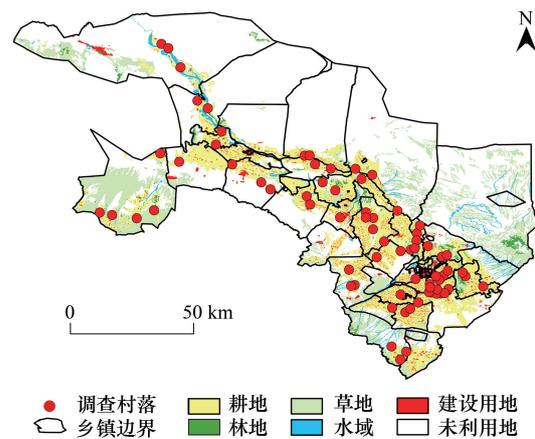


图 3 农户问卷村落分布图

Fig.3 Village distribution of questionnaire investigation

则遴选了能够表征经济-社会-生态复合系统的应对策略的指标,并在参考相关文献<sup>[18-20]</sup>的基础上构建黑河中游生态安全评价指标体系见表 1:

表 1 黑河中游生态安全评价指标体系

Table 1 Ecological security evaluation index system in the middle reaches of the Heihe River

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标描述 Index description	
黑河中游生态安全 Ecological security in the middle reaches of the Heihe River	压力	总人口 <sup>1</sup>	区域总人口和/人	
		人均 GDP <sup>1</sup>	生产总值与总人口之比/(元/人)	
		薄膜施用量 <sup>1</sup>	区域薄膜施用量/t	
		化肥施用量 <sup>1</sup>	区域化肥施用量/t	
		水资源利用率 <sup>2</sup>	用水量占水资源总量比例/%	
		地下水开采率 <sup>2</sup>	地下水开采量占地下水资源比例/%	
		有效灌溉面积 <sup>2</sup>	正常灌溉的耕地面积/hm <sup>2</sup>	
		状态	景观破碎度 <sup>3</sup>	景观的碎裂程度
			景观多样性 <sup>3</sup>	景观的丰富度
			森林面积 <sup>4</sup>	森林总面积/km <sup>2</sup>
	草地面积 <sup>4</sup>		草地总面积/km <sup>2</sup>	
	响应	湿地面积 <sup>4</sup>	湿地总面积/km <sup>2</sup>	
		降水补给量 <sup>2</sup>	区域总降水量/m <sup>3</sup>	
		水资源总量 <sup>2</sup>	地下水资源与地表水资源总量/m <sup>3</sup>	
		第三产业比重 <sup>1</sup>	第三产业产值占总产值比例/%	
		非农业人口比重 <sup>1</sup>	农村人口占总人口比例/%	
		高效节水灌溉面积 <sup>2</sup>	按照灌溉水利用系数:渠灌 0.56,管灌 0.65,喷灌 0.69,微灌 0.73对四种高效灌溉方式的面积加权平均/hm <sup>2</sup>	
		生态用水量 <sup>2</sup>	生态系统需水量/m <sup>3</sup>	
		农户非农收入比重 <sup>5</sup>	非农收入占家庭总收入比例/%	
		供给服务价值 <sup>3</sup>	供给服务的价值/元	
调节服务价值 <sup>3</sup>		调节服务的价值/元		
支持服务价值 <sup>3</sup>	支持服务的价值/元			
文化服务价值 <sup>3</sup>	文化服务的价值/元			

数据来源 1 为统计年鉴,2 为水资源公报,3 为核算数据,4 为土地利用数据,5 为农户问卷

### 3.2 PSR 评价指标权重的确定

根据公式(1)—(5)计算了黑河中游生态安全评价指标的权重。由表 2,在黑河中游生态安全指标体系中,高效节水灌溉面积的权重最高,近年来为保障国家西部生态屏障的安全,黑河中游实施了大规模高效节水项目,2001—2015 年高效节水灌溉面积增长了 55.17%,因此该指标对生态安全的影响程度最高;其次,生态用水量的权重为 0.0617,在生态脆弱的黑河中游地区,生态用水量的多少与生态系统的稳定性高度相关,因此生态用水量的权重较高;此外,地下水开采率与第三产业比重的权重均高于 0.60,表明其对区域生态安全的影响程度也较高。

### 3.3 生态安全评价

根据公式(6)及表 2 计算了黑河中游生态安全压力、状态、响应指数(图 4),结合相关文献<sup>[18,29]</sup>与研究区实际情况,建立生态安全等级划分标准(表 3)。结果表明:2001—2015 年黑河中游压力指数呈现波动下降趋势:2001 年压力指数为 0.2615,2008 年降为 0.1644,2015 年进一步降为 0.0569。该指数越来越小,表明生态系统所面临压力越来越大,压力指数对生态安全的贡献率越来越低;2001—2015 年状态指数呈现先增长后减少的趋势:2001 年状态指数为 0.1082,2008 年增至 0.1313,2015 年降至 0.1236;2001—2015 年响应指数越来越高:2001 年响应指数为 0.0051,2008 年增至 0.1590,2015 年高达 0.4083,响应指数增长表明经济-社会-生态复

合系统采取了相应策略应对区域生态环境问题。

表 2 黑河中游生态安全评价指标熵值与权重

Table 2 Ecological security evaluation indexes entropy and weight in the middle reaches of the Heihe River

指标层 Index layer	方向 Direction	指标熵值 Index entropy	指标权重 Index weight
总人口 Total population	-	0.9244	0.0370
人均 GDP Per capita GDP	-	0.9182	0.0400
薄膜施用量 Application amount of film	-	0.9476	0.0256
化肥施用量 Application amount of chemical fertilizer	-	0.9108	0.0436
水资源开发利用率 Water resources development rate	-	0.8991	0.0493
地下水开采率 Groundwater development rate	-	0.8744	0.0614
有效灌溉面积 Effective irrigation area	-	0.9323	0.0331
景观破碎度 Landscape fragmentation	-	0.9416	0.0286
景观多样性 Landscape diversity	+	0.8939	0.0519
森林面积 Forest area	+	0.9136	0.0423
草地面积 Grassland area	+	0.9335	0.0325
湿地面积 Wetland area	+	0.9165	0.0408
降水量 Precipitation	+	0.9257	0.0363
水资源总量 Total water resources	+	0.9341	0.0322
第三产业比重 Proportion of tertiary industry	+	0.8764	0.0604
非农业人口比重 Proportion of non-agricultural population	+	0.9096	0.0442
高效节水灌溉面积 Area of efficient water-saving irrigation	+	0.8418	0.0774
生态用水量 Ecological water consumption	+	0.8738	0.0617
农户非农收入占比 Proportion of farmers' non-agricultural income	+	0.9147	0.0417
供给服务价值 Provision service value	+	0.9040	0.0469
调节服务价值 Regulation service value	+	0.9187	0.0398
支持服务价值 Support service value	+	0.9046	0.0466
文化服务价值 Culture service value	+	0.9453	0.0267

表 3 生态安全等级划分标准

Table 3 Criteria for classification of ecological security

安全等级 Safety level	安全指数 Safety index	级别特征 Level characteristic
不安全 Unsafe	0—0.2	生态系统结构极不合理,生态系统服务功能严重退化,抗干扰能力极差,生态恢复难度很高
较不安全 Less safe	0.2—0.4	生态系统结构很不合理,生态系统服务功能发生退化,抗干扰能力较差,生态恢复较为困难
临界安全 Critically safe	0.4—0.6	生态系统结构不合理程度较低,生态系统服务功能虽受到一定程度破坏,但能维持其基本运转,能抵御部分干扰,生态系统恢复难度较低
较安全 Relatively safe	0.6—0.8	生态系统结构较为合理,生态系统服务基本未发生退化,生态系统具有较强的恢复能力与抗干扰能力
安全 Safe	0.8—1.0	生态系统结构合理,生态系统服务未发生退化,生态系统抗干扰能力强,不需进行生态恢复与重建

根据公式(7)计算了黑河中游生态安全综合指数(图4),结果表明2001年生态安全综合指数为0.3748,压力指数对综合指数贡献率最高,表明此时生态系统面临压力最小;2008年生态安全综合指数增至0.4548,压力、状态与响应指数的贡献率均为30%左右,表明此时生态系统面临压力有所增长,同时开始采取积极措施提高生态安全水平;2015年生态安全综合指数进一步增长至0.5888,响应指数贡献率最高,表明经济-社会-生态复合系统采取了一系列措施显著提高生态安全水平。根据表3,2001年生态安全等级为“较不安全”,

2008 年生态安全等级升为“临界安全”,虽然 2015 年生态安全综合指数增加,但生态安全等级仍处于“临界安全”状态。

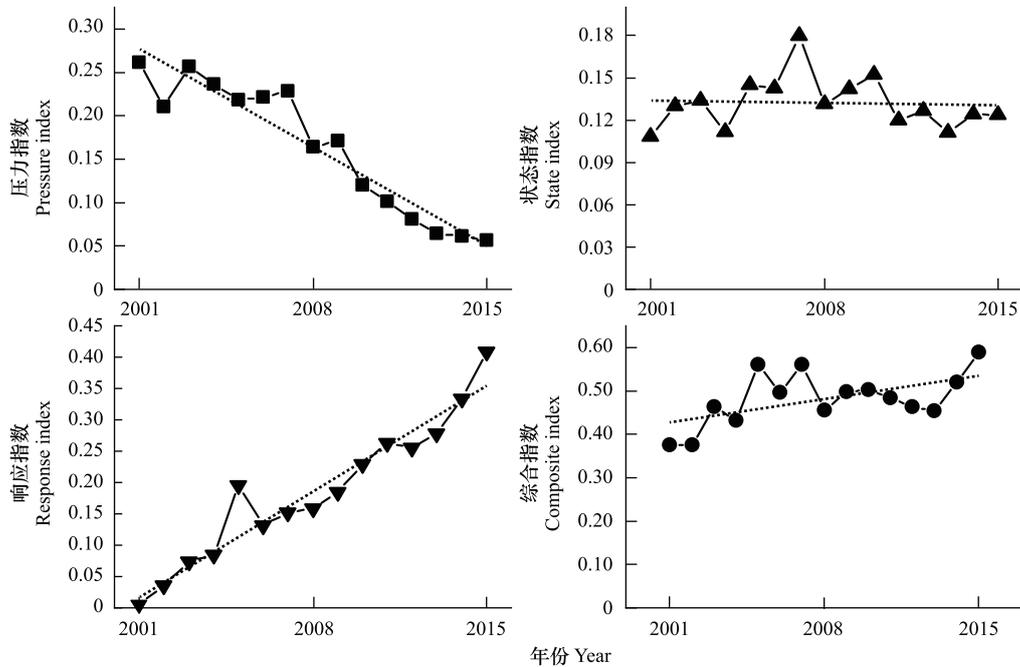


图 4 黑河中游生态安全变化趋势

Fig.4 Trends of ecological security in the middle reaches of the Heihe River

### 3.4 障碍因子诊断

根据公式(8)计算了各个指标对生态安全的障碍度,列出了 2001、2008、2015 年障碍度最高的 5 个因子(表 4),结果表明 2001 年影响生态安全的障碍因子主要是响应层指标,高效节水灌溉面积是最主要的障碍因子,其次是生态用水量;2008 年影响生态安全的障碍因子主要是响应层和压力层指标,高效节水灌溉面积仍然是障碍度最高的因子;2015 年影响生态安全的障碍因子主要是压力层指标,随着人类生产生活对水资源的需求增长,地下水开采率的障碍度最高,化肥施用量也对生态安全产生了显著影响。以上表明随着响应水平的提高,2001—2015 年障碍因子逐渐由响应层指标转为压力层指标,降低水资源消耗量和环境污染水平成为提高生态安全水平的重要途径。

表 4 黑河中游生态安全障碍因子识别

Table 4 Identification of obstacles to ecological security in the middle reaches of the Heihe River

障碍度排序 Order of obstacles	1	2	3	4	5
2001	高效节水灌溉面积	生态用水量	景观多样性	供给服务价值	支持服务价值
2008	高效节水灌溉面积	总人口	水资源利用率	第三产业比重	生态用水量
2015	地下水开采率	化肥施用量	森林面积	人均 GDP	有效灌溉面积

## 4 讨论与建议

基于生态系统服务与生态安全格局间的内在联系,根据人类社会与生态系统间以生态系统服务流动为纽带形成的反馈机制,构建了基于生态系统服务理论的 PSR 模型。一方面为生态安全评价提供综合的量化指标体系提供了逻辑基础,拓展了人们在生态安全评估方法领域的研究视野;另一方面该模型耦合了人类活动

与区域生态安全,利于深入理解黑河中游生态安全维持机制,拓展人们对生态安全评价、生态安全维持与提高的认识。

黑河中游是流域生产生活的主要承载区,具有较高的农业活动强度。近年来生态系统面临的环境污染和资源消耗问题越来越大:农业生产过程中化肥、农药、薄膜施用量显著增长,2001—2015 年化肥施用量增长 22.84%;此外,生产生活对水资源的需求量越来越高,2001—2015 年地下水开采量增长一倍有余,随着生态系统面临的压力越来越大,压力指数持续降低。在人类活动干扰下,中游绿洲生态系统结构和功能略有降低,植被退化、景观破碎度增加,虽然在湿地保护工程实施背景下,水域面积有所增长,但状态指数仍呈现微弱的降低趋势。与此同时,经济-社会-生态复合系统采取了相应策略应对生态环境问题;随着绿洲经济发展及技术水平的提高,政府对高效节水灌溉工程投入越来越大,2001—2015 年高效节水灌溉面积增长了 55.17%,在一定程度上改善了缺水状况。2001—2015 年 GDP 增长四倍有余,经济发展促进了产业和劳动力转移,湿地保护工程的实施也促进生态系统服务价值增长,响应指数呈现增长趋势,是生态安全水平提高的主要原因。

总体来看,水资源是制约黑河中游绿洲发展的命脉,水资源丰富与否决定了绿洲规模的大小。与水资源利用相关的节水灌溉面积、生态需水量、地下水开采率等均是影响区域生态安全程度较高的因子。维持区域水资源供应平衡,实现水资源可持续利用是提高该区域生态安全水平的核心。在较短时间尺度上,水资源供应格局呈现稳定趋势,因此,应从降低水资源消耗量、提高水资源利用效率角度入手提高区域生态安全水平。基于生态安全评价结果,结合农户调查问卷,提出了以下提高生态安全水平的建议:

(1)坚持生态保护优先。黑河中游绿洲是全国重要的商品粮生产基地,2001—2015 年黑河中游耕地面积增长 20.40%。荒地开垦、乱砍滥伐导致植被退化,2001—2015 年林地、草地面积分别减少 19.97%、3.68%。此外,耕地扩张及大水漫灌加剧了水资源消耗,2001—2015 年地下水开采量增加,超越了生态系统的承载力,影响了区域生态安全。因此,为实现黑河中游生态经济可持续发展,必须坚持生态保护优先原则,恢复与重建黑河中游退化生态系统,保障天然绿洲与人工绿洲协调发展。

(2)调整种植和产业结构。2015 年黑河中游绿洲农业用水量占比高达 90% 以上,但农业产值占比不足 30%,水资源投入产出比例较低。因此,首先需降低高耗水作物比例,在发展制种玉米的基础上,进一步发展大田反季蔬菜、花卉和酿酒葡萄种植等,构建“节水型与高效益”的新型农业体系。问卷调查结果显示虽然 2001—2015 年经济作物种植比例有所提升,但农户认为温室成本较高,提高相关补贴标准、加大扶持力度有助于提高农户调整种植结构的积极性。此外,应进一步推进产业结构优化,发展生态产业,提高水资源利用效率。

(3)发展高效节水灌溉技术。2001—2015 年张掖市微灌和低压管灌面积分别增长 34767  $\text{hm}^2$  和 43100  $\text{hm}^2$ ,是生态安全水平增长的重要原因,但仍存在覆盖率低、节水工程建设标准低等问题。问卷调查结果显示,高达 40.96% 的农户认为滴灌等节水设施灌溉效果差,导致粮食减产,收入降低。而且农户认为滴灌水量过小,耕地表层土壤干旱,加重了风沙危害,以上因素影响了农户参与节水灌溉的积极性。因此,发展适于研究区的高效节水技术,实现节水、增收双赢才能真正提高节水灌溉效益,解决水资源短缺问题。

(4)提高公众生态保护意识。问卷调查结果显示 69.65% 的农户认为研究区水资源不短缺,84.05% 的农户认为水资源污染不严重,76.34% 的农户认为经济发展比生态保护更重要,表明农户对水资源短缺、农业面源污染了解较少,生态保护意识淡薄。虽然 86.82% 的农户注意节约用水,但主要原因是农户认为水资源费用定价高,农户倾向通过节约用水减少开支,而非自发节水行为。因此,亟需加强生态保护宣传,提高公众水资源节约和保护意识,实现生态经济可持续发展。

本文运用熵值法对 PSR 模型的指标权重进行计算,该方法根据各指标所提供信息量大小来确定权重,克服了主观赋值法存在的评价结果不稳定的现象,在一定程度上提高了评价质量<sup>[20,30]</sup>。但是 PSR 模型在指标遴选方面存在一定程度的重叠问题:以评价大城市生态安全为例,压力层常选指标为表征生态系统服务获取强度的“总人口”,而状态层常选指标为表征生态系统结构的“林地面积”。实际上人口数量增长越快,城市扩

张对林地的侵占程度也越高,因此“总人口”与“林地面积”存在重复性,导致生态安全评价结果出现偏差,降低了将评价结果应用于生态环境管理中的可行性。因此,如何科学遴选独立的 PSR 指标体系将是下一步生态安全评价研究的重点。

## 5 结论

本文基于 PSR 模型,耦合生态系统服务理论,构建了黑河中游生态安全评价指标体系:其中压力指标主要表征生态环境出现问题的原因,即外界对生态系统所造成压力及人类对生态系统服务的获取强度;状态指标主要表征在各种压力状态下,生态系统当前的结构与功能所发生的变化;响应指标则主要表征经济系统、社会系统及生态系统所采取的应对生态环境变化的具体措施。

黑河中游生态安全评价结果表明:2001—2015 年化肥施用量与灌溉用水增加导致生态系统所面临压力越来越大,但由于经济-社会-生态复合系统采取了相应策略应对区域生态环境问题,黑河中游绿洲生态安全水平略有提高,生态安全综合指数由 0.3748 增至 0.5888,生态安全等级由“较不安全”达到“临界安全”状态。

虽然黑河中游生态安全呈现波动增长趋势,但 2015 年生态安全等级仍处于“临界安全”状态,且稳定性较差,因此黑河中游生态安全水平有待进一步提高。在以上研究的基础上,结合问卷调查结果,围绕干旱区绿洲发展命脉—水资源的可持续利用提出了坚持生态保护优先、调整种植和产业结构、发展高效节水灌溉技术、提高公众生态保护意识等提高研究区生态安全水平的相关对策与建议。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Whitford W G, Rapport D J, deSoyza A G. Using resistance and resilience measurements for ‘fitness’ tests in ecosystem health. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57(1): 21-29.
- [ 2 ] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [ 3 ] 王晓峰,吕一河,傅伯杰.生态系统服务与生态安全. *自然杂志*, 2012, 34(5): 273-276, 298-298.
- [ 4 ] 郭中伟,甘雅玲.关于生态系统服务功能的几个科学问题. *生物多样性*, 2003, 11(1): 63-69.
- [ 5 ] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬.区域生态安全格局:概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [ 6 ] 杨兆青,陆兆华,刘丹,袁明扬,王菲,荣正阳,黄玉凯.煤炭资源型城市生态安全评价——以锡林浩特市为例. *生态学报*, 2021, 41(1): 280-289.
- [ 7 ] Farley J, Costanza R. Payments for ecosystem services: from local to global. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2060-2068.
- [ 8 ] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, Van Soest D, Termansen M. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the united kingdom. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [ 9 ] Kandziora M, Burkhard B, Müller F. Mapping provisioning ecosystem services at the local scale using data of varying spatial and temporal resolution. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 47-59.
- [ 10 ] 彭保发,郑俞,刘宇.耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. *地理科学*, 2018, 38(3): 361-367.
- [ 11 ] Daily G C, Polasky S, Goldstein J H, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [ 12 ] Zhang X J, Ju C Y. PSR-based ecosystem health evaluation research in yellow river delta wetland. *Advanced Materials Research*, 2013, 749: 118-124.
- [ 13 ] Bai X R, Tang J C. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 881-887.
- [ 14 ] Zhao C Y, Nan Z R, Cheng G D. Methods for modelling of temporal and spatial distribution of air temperature at landscape scale in the southern Qilian mountains, China. *Ecological Modelling*, 2005, 189(1/2): 209-220.
- [ 15 ] 常学礼,赵文智,李秀梅,李守波.基于生态服务价值的张掖绿洲生态安全评价. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 396-406.
- [ 16 ] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 265-283.
- [ 17 ] 杨雪获,白永平,车磊,乔富伟,周亮.甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析. *生态学报*, 2020, 40(14): 4785-4793.
- [ 18 ] 艾克旦·依萨克,满苏尔·沙比提,阿曼妮萨·库尔班,赵景啟.阿克苏河流域绿洲生态安全评价及影响因子分析. *环境科学与技术*,

2020, 43(7): 217-223.

- [19] 徐钰德, 刘子金, 黄嵩, 李智睿, 赵志宏. 干旱区人工绿洲水土环境生态安全演变分析. 水利水电技术, 2021, 52(1): 105-115.
- [20] 王一山, 张飞, 陈瑞, 齐亚霄, 刘长江. 乌鲁木齐市土地生态安全综合评价. 干旱区地理, 2021, 44(2): 427-440.
- [21] 王琼, 卢聪, 李法云, 范志平. 基于主成分分析和熵权法的河流生境质量评价方法——以清河为例. 生态科学, 2017, 36(4): 185-193.
- [22] 谢作轮, 赵锐锋, 张丽华, 祝稳, 李洁, 梁丹. 干旱内陆河流湿地景观破碎化模型构建与尺度分析——以黑河中游湿地为例. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1834-1845.
- [23] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 陈晓, 孔福星. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价——以宁夏红寺堡区为例. 生态学报, 2018, 38(8): 2672-2682.
- [24] 孟霖, 郭杰, 欧名豪, 李昆鹏. 基于景观安全格局的城镇建设用地扩张多情景模拟研究——以扬州市为例. 土壤, 2018, 50(5): 1032-1040.
- [25] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [26] 陈亚宁. 干旱荒漠区生态系统与可持续管理. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] 郝丽娜, 粟晓玲. 黑河干流中游地区适宜绿洲及耕地规模确定. 农业工程学报, 2015, 31(10): 262-268.
- [28] Hooke R L, Martín-Duque J F, Pedraza J. Land transformation by humans: a review. GSA Today, 2012, 22(12): 4-10.
- [29] 李冲, 张璇, 许杨, 王晓, 郝芳华, 鱼京善. 京津冀生态屏障区人类活动对生态安全的影响. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3324-3332.
- [30] 庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 340-344.