

三生空间角度的甘肃长江流域水生态安全评价及障碍诊断

牛最荣, 贾玲

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:探讨水生态安全驱动机制,为水资源管理、配置等工作提供科学依据。以甘肃省长江流域为研究区域,从生态、生活、生产3个空间角度构建基于压力-状态-响应模型(简称PSR)的水生态安全评价指标体系,根据研究区2011–2020年水资源等资料,运用熵值法、综合指数法评价水生态安全状况等级,并用障碍度模型识别影响水生态安全的主要障碍因子。结果表明:甘肃省长江流域水生态安全指数呈基本安全-较不安全-基本安全变化,2020年为较安全状态;2011–2020年,生态、生产空间是水生态安全状态的主要限制空间,压力和响应系统是水生态安全状态影响的主要限制系统;影响水生态安全状况的最大障碍因子随着年份变化不断发生变化,近2年来的主要驱动因素为生产空间和压力系统。近10年研究区水生态安全形势较好。研究结果可为长江上游相似流域水生态保护、区域高质量发展提供科学依据。

关键词:三生空间;PSR模型;水生态安全;障碍因素;甘肃省长江流域

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674–3075(2023)02–0019–07

水生态安全作为评价水资源合理利用的重要内容之一,是决定区域经济高质量发展的核心因素,也是实现人水和谐的关键措施(彭建等,2016)。水生态安全评价结果可为保护水资源、维持生态平衡提供重要依据(Yao et al, 2020)。因此,在日益严峻的水资源短缺、洪涝灾害频发、生态环境恶化背景下(邓铭江等, 2020),水生态安全问题已成为学术界关注的热点内容。近年来,随着人类活动频繁,长江流域面临着水生态透支、水环境污染、水资源失衡等严峻的水生态安全问题(Song et al, 2019; Gao et al, 2020; 李德旺等, 2021),开展流域水生态安全评价工作迫在眉睫。而甘肃省作为国家西部重要生态屏障,构建良好的水生态安全体系对其区域全方位建设与长远发展至关重要(Li et al, 2019)。

如何构建一套科学全面的评价指标体系是水生态安全评价的关键环节(邓捷铭和贾绍凤, 2022)。以往研究主要通过依据自然-社会-经济复合系统(戴文渊等, 2022)或者构建模型(万生新和王悦泰, 2019; 左其亭等, 2022)选取指标,但由于水生态安全研究属于多学科交叉领域,具有指标体系构建复杂、评价过程

模糊等特点(戴文渊等, 2021)。尽管现有的指标筛选方式弥补了以往研究中“就水言水”的缺陷,但总体而言,指标选取的视角仍旧单一。水资源作为人类赖以生存的重要基础(Zhang & Vesselinov, 2017; 牛最荣等, 2021),其所处的生态、生活、生产空间(简称“三生空间”)的平衡及协调性直接决定了水生态安全状况的优劣程度(刘鹏等, 2017)。因此,以三生空间为研究空间尺度,构建水生态安全评价指标体系,可以较好地反映水生态安全在生态、生活、生产等用途上的发展规律(李若飏等, 2022),同时水生态安全指数也能解释不同用水方式间的主要矛盾,为水资源均衡利用提供参考。

识别水生态安全状况变化的影响因素,探讨水生态安全驱动机制,是水生态安全评价的最终目的。本文以甘肃境内长江流域为研究区域,构建基于“三生空间”视角与PSR模型结合的水生态安全评价指标体系,采用障碍度模型分析水生态安全的影响因素,以阻力最大的指标做为水生态安全变化的主要驱动因素。通过全面分析水生态安全影响因子,探讨近10年甘肃省长江流域水生态安全驱动机制,以期为甘肃省水资源管理、配置等工作提供科学依据,同时也为长江流域水生态保护相关工作提供参考建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省长江流域位于甘肃省南部, 102°34′~106°37′E, 32°06′~34°32′N(图1),涉及陇南市、天水

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 甘肃省重点研发计划(21YF5FA094); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划(GSAU-JSYF-2021-006, GSAU-JSYF-2021-016)。

作者简介: 牛最荣, 1964年生, 男, 正高级工程师, 主要从事水文学与水资源的研究与教学。E-mail: Niuzr@gsau.edu.cn

市和甘南藏族自治州,流域面积约3.85万km²。流域水资源较甘肃省其他区域丰富,据《甘肃省水资源公报(2020)》统计,2020年甘肃省长江流域平均降水量为841.6 mm,水资源总量184.68 亿m³,其中自产地表水资源量183.80 亿m³,地下水资源量47.07 亿m³。

1.2 数据来源

水生态安全评价指标的原始数据主要来源于2011–2020年《甘肃省统计年鉴》《甘肃省水资源公报》《甘肃省水土保持公报》《长江流域及西南诸河水资源公报》等。

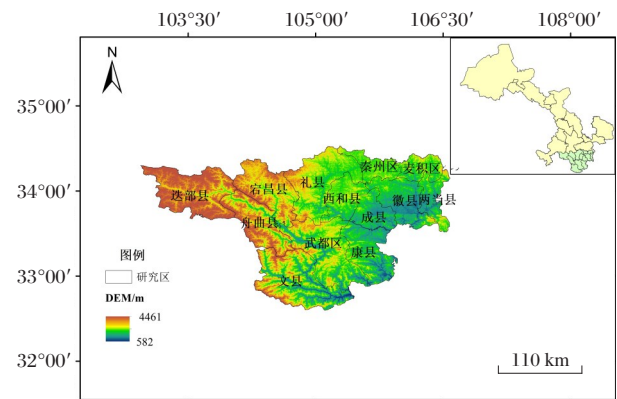


图1 研究区示意

Fig.1 Location of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系构建及归一化处理 遵循指标构建的基本原则,在已有研究的基础上(张洋等,2021;郑乐乐等,2022),结合甘肃省长江流域水资源的实际使用情况,运用PSR(压力–状态–响应)模型从生态、生活、生产不同的空间视角选取了24个指标,具体指标见表1。

为了便于后续计算,采用极差标准化方法对选取指标进行量纲统一化:

正向指标:

$$R'_{ij} = \frac{R_{ij} - \min(R_{ij})}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})}$$
 ①

负向指标:

$$R'_{ij} = \frac{\max(R_{ij}) - R_{ij}}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})}$$
 ②

式中: R_{ij} 是原始指标数据, R'_{ij} 是标准化后的数据,其中*i* = 1,2,⋯, *n*, *j* = 1,2,⋯, *m*。

1.3.2 指标权重确定方法 采用熵值法计算指标权重,通过各指标所占权重的大小来反映指标的重要性(Tang et al, 2020; 谢华晶等, 2021)。具体公式如下:

$$E_j = -k \sum_{j=1}^m F_{ij} \times \ln F_{ij}$$
 ③

$$F_{ij} = \frac{R'_{ij}}{\sum_{i=0}^n R'_{ij}} (F_{ij} = 0, \ln F_{ij} = 0)$$
 ④

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^m E_j}$$
 ⑤

式中: E_j 为信息熵; $k = \frac{1}{\ln(n)}$; ω_j 为各指标层所占权重; F_{ij} 为指标比重。

表1 甘肃省长江流域水生态安全评价指标体系
Tab.1 Evaluation index system for water ecological security in the Yangtze River basin of Gansu Province

目标层	空间层	准则层	指标层	指标性质
水生态安全评价指标体系	生态	压力(P)	生态用水比例 P_{11}	-
			地表水源供水量 P_{12}	+
			地下水源供水量 P_{13}	+
		状态(S)	地下水资源量 S_{11}	+
			地表水资源量 S_{12}	+
			生态环境耗水量 S_{13}	-
		响应(R)	城镇生态用水量 R_{11}	-
			地下水开发利用程度 R_{12}	-
			缺水程度 R_{13}	-
	生活	压力(P)	人均日生活用水量 P_{21}	-
			人口密度 P_{22}	-
			生活污水年排放量 P_{23}	-
		状态(S)	城镇化率 S_{21}	+
			人均水资源占有量 S_{22}	+
			响应(R)	居民生活耗水率 R_{21}
	生活污水处理率 R_{22}	+		
	生产	压力(P)		工业用水率 P_{31}
			农业用水比例 P_{32}	-
			工业废水年排放量 P_{33}	-
		状态(S)	农田有效灌溉面积占耕地面积的比重 S_{31}	+
			单位GDP用水量 S_{32}	-
人均GDP R_{31}			+	
响应(R)		水资源开发利用程度 R_{32}	+	
	节水灌溉率 R_{33}	+		

注:“+”表示正向指标;“-”表示负向指标。
Note:“+” indicates a positive indication;“-” indicates a negative indication.

1.3.3 生态安全指数计算及评价等级划分 生态安全指数是指各指标标准化后的值与其权重的乘积之和(Li et al, 2021; 李若飏等, 2022),具体公式如下:

$$EI = \sum_{j=1}^m R'_{ij} \times \omega_j$$
 ⑥

生态安全指数可以反映水生态安全状况,水生态安全等级划分标准参照相关学者研究成果(左伟等,2002;崔文彦等,2020;蒋忙舟等,2022),甘肃省长江流域水生态安全状况等级划分见表2。

表2 水生态安全等级划分
Tab.2 Grading of water ecological security levels

水生态安全综合指数	安全状态分级	水生态安全状态
1~0.8	1	很安全
0.8~0.6	2	较安全
0.6~0.4	3	基本安全
0.4~0.2	4	较不安全
0.2~0	5	很不安全

1.3.4 障碍度模型 为进一步探讨影响水生态安全的主要障碍因子(Ou et al,2017;Zhu et al,2021),通过因子贡献度、指标偏差度计算障碍度值,具体公式如下:

$$I_{ij} = 1 - R'_{ij} \tag{7}$$

$$F_j = \omega_j \tag{8}$$

$$H_{ij} = \frac{F_j \times I_{ij}}{\sum_{i=1}^n (F_j \times I_{ij})} \tag{9}$$

$$H_j = \sum_{i=1}^n H_{ij} \tag{10}$$

式中: H_{ij} 、 H_j 分别表示各指标层、准则层对水生态安全影响的障碍度值。

2 结果与分析

2.1 评价指标权重确定

图2为熵值法计算的指标权重雷达图,由图2(a)可知,农田有效灌溉面积占耕地面积的比重

(S_{31})、地表水源供水量(P_{12})、生活污水处理率(R_{22})、工业用水率(P_{31})、地下水开发程度(R_{12})所占权重分别为7.40%、6.07%、5.87%、5.85%、5.71%,累积权重为30.90%,是甘肃省长江流域水生态安全的主要影响指标;人均日生活用水量(P_{21})、生态环境耗水量(S_{13})、居民生活耗水率(R_{21})、工业废水年排放量(P_{33})、城镇生态用水量(R_{11})的累积指标权重仅达11.35%,是流域水生态安全的次要影响因子。

由图2(b)可知,从三生空间视角来看,生态空间所占权重为36.37%,对流域水生态安全的影响程度最大;生产空间次之,权重为36.12%;最后是生活空间。从PSR系统视角来看,压力、状态、响应系统所占权重分别为35.45%、31.20%、33.36%,即压力和响应系统是流域水生态安全的主要驱动系统。

2.2 水生态安全综合指数变化趋势分析及结果评价

根据2011–2020年甘肃省长江流域水生态安全综合指数的变化趋势(图3)可知,近10 a,甘肃省长江流域水生态安全状态呈基本安全–较不安全–基本安全波动变化,其中2020年综合指数最高,为0.6123,水生态安全状况较安全,这与生态空间综合指数上升有关;2014年综合指数最低,为0.3341,水生态安全状况较不安全,主要是由于生活空间相关指标综合指数较低造成。

采用障碍度模型进一步分析甘肃省长江流域水生态安全变化的驱动因子,如图4可知,农田有效灌溉面积占耕地面积的比重(S_{31})、人均日生活用水量(P_{21})、节水灌溉率(R_{33})对水生态安全的影响逐年加强,农业用水比例(P_{32})、人均GDP(R_{31})、单位GDP用水量(S_{32})对水生态安全的影响正在逐年减弱,表明贯彻节水理念、大力推广节水灌溉新技术是维护甘

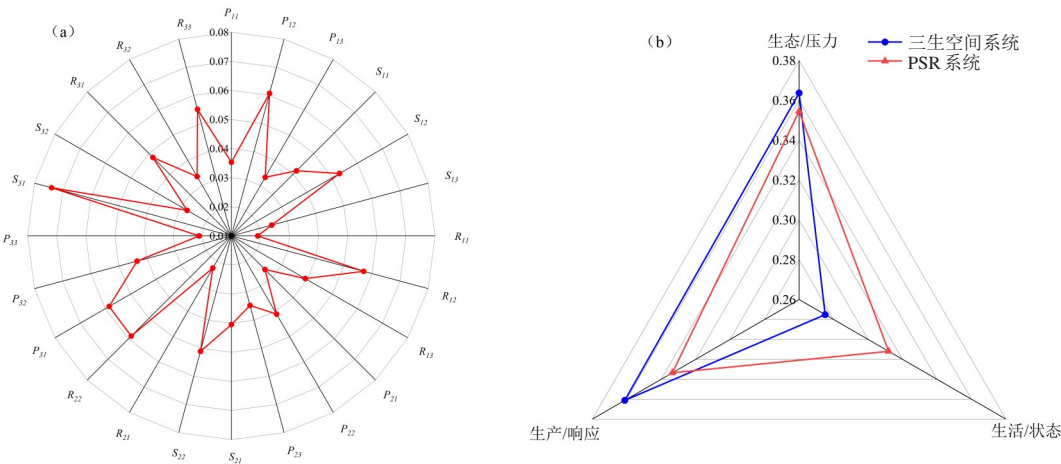


图2 指标权重雷达
Fig.2 Radar graph showing the weights of different indices

肃省长江流域水生态安全的重要工作方向。近 10 a, 随着甘肃省长江流域水生态安全指标大小的变化, 最大障碍因子也随之发生变化, 如: 2011 年最大障碍因子是人均 GDP (R_{31})、2020 年最大障碍因子为农田有效灌溉面积占耕地面积的比重 (S_{31})。

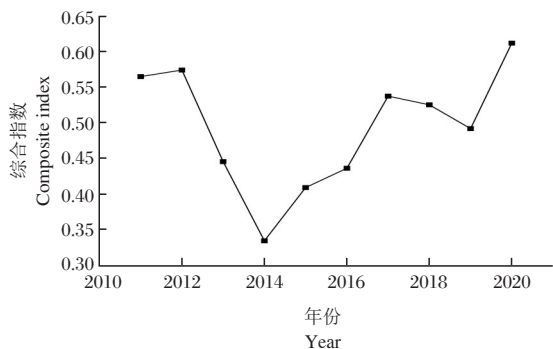


图 3 水生态安全综合指数变化趋势

Fig.3 Variation of the water ecological security comprehensive index (2010–2020)

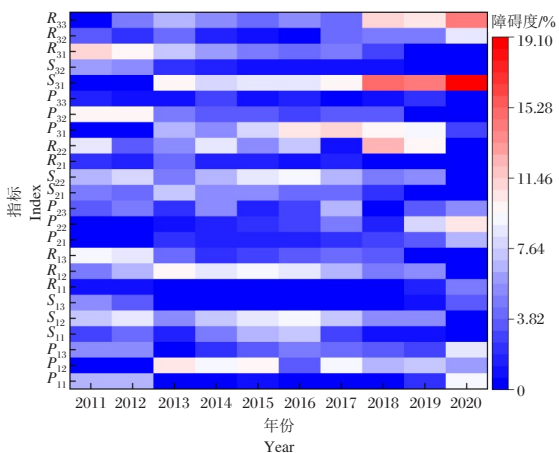
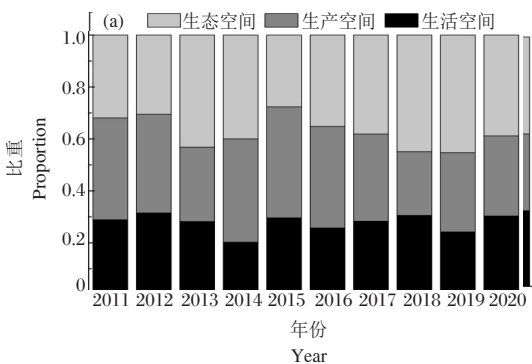


图 4 水生态安全障碍因子分析

Fig.4 Analysis of obstacle factors for water ecological security



2.3 三生空间下水生态安全指数及障碍因子分析

图 5 为三生空间下综合指数所占比重及其变化趋势。生态空间自 2015 年之后综合指数呈上升趋势, 说明随着绿色发展理念的提出, 水生态相关活动明显增多, 相应所需的水资源量不断增加, 对水生态安全的影响程度明显上升。生活空间综合指数在 2014 年出现最低值, 生产空间综合指数呈“W”型变化, 分别在 2013 年、2018 年出现最低值。

对三生空间系统下水生态安全进行障碍因子分析(图 6), 2011、2012、2015 和 2016 年, 生态空间是水生态安全的主要障碍因子, 2014 年生态和生产空间障碍度值持平, 剩余年份生产空间障碍度值最大, 是水生态安全的主要限制因素。自 2017 年以来, 甘肃省长江流域水生态安全的主要障碍因素为生产空间, 表明随着社会经济的快速发展, 在今后的水资源开发利用中, 仍需开展水资源优化配置研究, 合理分配农业、工业等生产用水, 大力提倡节水措施。

2.4 PSR 系统下水生态安全指数变化及障碍因子分析

从压力-状态-响应系统分析, 由图 7 可知, 三大系统综合指数整体呈下降-上升的波动变化趋势, 压力系统综合指数 2011–2014 年呈下降趋势, 2014–2020 年呈波动上升变化, 主要是因为工业用水率 (P_{31})、地表水源供水量 (P_{12}) 的逐年增加; 状态系统综合指数 2011–2015 年呈下降趋势, 2015 年之后呈上升趋势, 主要与人均水资源占有量 (S_{22})、地下水资源量 (S_{11})、地表水资源量 (S_{12}) 的变化趋势有关; 响应系统综合指数 2 次低值, 2013 年出现最低值主要是因为节水灌溉率 (R_{33}) 下降、缺水程度增加。2018 年出现低值主要是因为地下水开发程度 (R_{12}) 降低。由图 7(b) 可知, 2016 年之前, 压力系统占水生态安全综合指数比重最大,

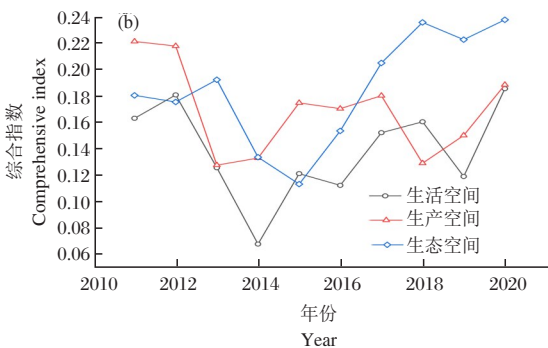


图 5 三生空间下综合指数所占比重及其变化趋势

Fig.5 Variation and proportion composition of the comprehensive index under ecology- life-production space system (2010–2020)

之后与状态、响应系统所占比重差距不断缩小,整体来看,三大系统综合指数占比逐渐趋向均等化。

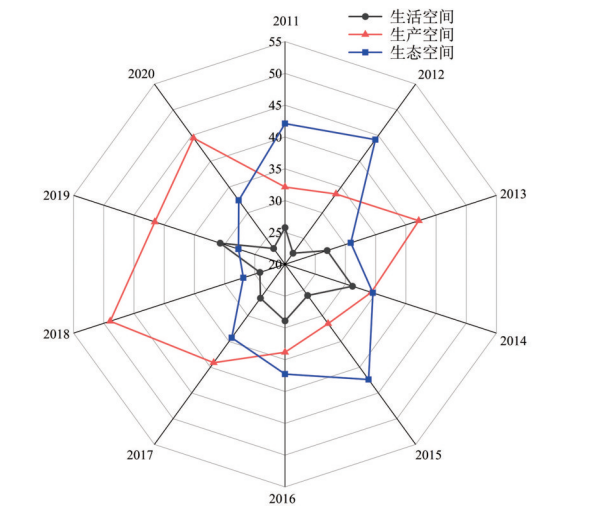


图6 三生空间下水生态障碍度变化

Fig.6 Changes of obstacle degree of water ecological security under ecology- life-production space system

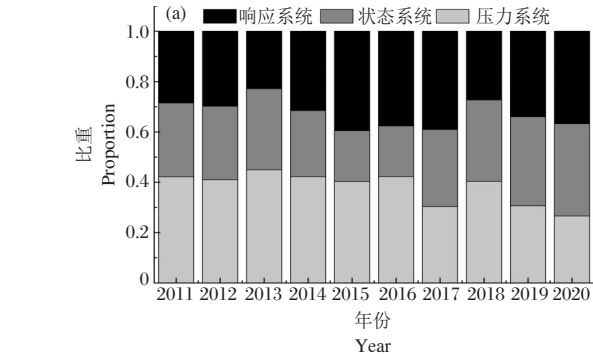


图7 PSR系统综合指数变化趋势

Fig.7 Change trend and proportion composition of the comprehensive index under pressure-state-response system.

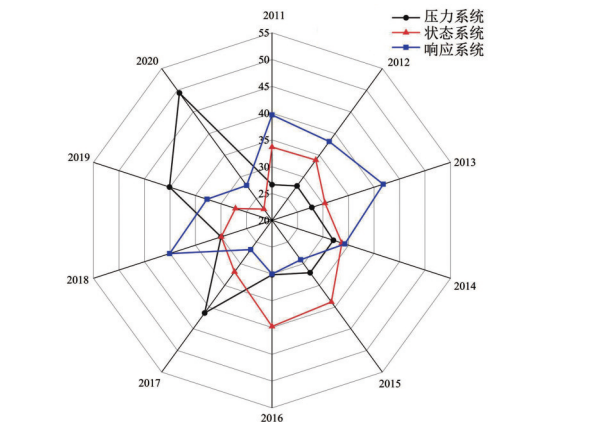


图8 PSR系统下水生态障碍度变化

Fig.8 Variation of obstacle degree for water ecological security under the pressure-state-response system (2010-2020)

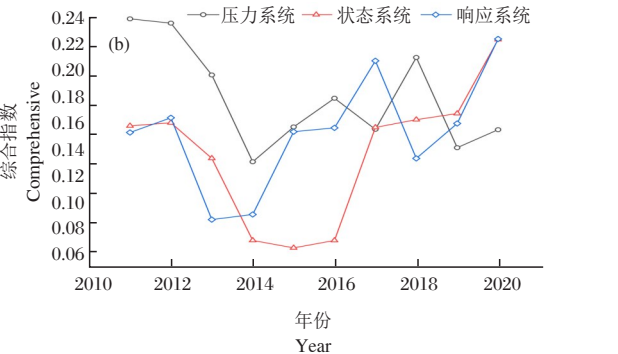
根据PSR系统分析水生态障碍因子(图8),2011、2012、2013、2014和2018年响应系统的障碍度最大,其中,人均GDP(R_{31})、地下水开发利用程度(R_{12})和生活污水处理率(R_{22})是水生态安全的主要障碍因子;2015年和2016年状态系统障碍度值最大,地表水资源量(S_{12})为这两年水生态安全主要的影响因素,2017、2019和2020年是压力系统,工业用水率(P_{31})和人口密度(P_{22})是水生态安全的主要障碍因子。

3 讨论

3.1 指标体系的合理性

甘肃省长江流域自2014年以后水生态安全水平也呈逐年上升趋势,这一结果与其他河流(左其亭等,2021;戴文渊等,2022)的情况较为符合。

合理选取与量化评价指标是构建科学评价体系的重要前提。本文考虑到生态、生活和生产空间的功能性和适宜性,以及水对于不同空间的重要性,评价体系中包括工农业生产指标、人居环境保障指标



和生态调节供给指标。但是,研究区域生态脆弱、地质灾害多发,土地资源受复杂多样的生态、生活和生产空间的制约,加之经济发展规划、生态政策约束,选取指标类型在一定程度上还有考虑不足之处,因此,今后仍需进一步深入开展指标选取视角等方面的研究。

3.2 水生态安全的主要障碍因素

水生态安全各指标障碍度的大小代表其对水生态安全状态的影响阻力大小(任潇潇和牛成英,2021)。本研究发现,研究区2011年最大障碍因子是人均GDP(R_{31})、2020年最大障碍因子为农田有效灌溉面积占耕地面积的比重(S_{31})。主要原因是受地形限制,研究区域耕地资源有限,且滑坡、泥石流、洪水等自然灾害频发,农田和灌溉工程均易受到损毁。

从三生空间角度分析,研究区域自2015年以来,

生态空间下水生态安全综合指数呈上升趋势,2017年后研究区域水生态安全的主要障碍因素转变为生产空间。这是由于主要河流实施最严格的水资源管理制度,全面推行河湖长制,强化水污染治理、实施水生态修复等措施,有力保障了流域生态安全,水生态持续向好。从压力-状态-响应系统分析,2011-2014年响应系统的障碍度值最大,这是因为早先生态保护重视程度不够等造成。随着水资源保护力度的加大,水生态环境保持良性发展,水生态安全障碍因素也随之发生变化。近年来,压力系统成为水生态安全变化的主要限制系统,工业用水率(P_{31})和人口密度(P_{22})是水生态安全的主要障碍因子,说明随着生产生活用水量增加,环境生态用水量相对减少。因此,实施节约用水、提高水重复利用率,降低工业万元增加值用水量,是当前缓解水生态安全用水压力的主要途径。

参考文献

- 崔文彦,刘得银,梁舒汀,等,2020.永定河流域水生态环境质量综合评价[J].水生态学杂志,41(2):23-28.
- 邓铭江,黄强,畅建霞,等,2020.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,31(5):775-792.
- 邓捷铭,贾绍凤,2022.区域水安全评价指标体系构建与应用[J].水科学进展,33(1):48-56.
- 戴文渊,陈年来,李金霞,等,2021.基于SENCE概念框架的区域水生态安全评价研究——以甘肃地区17流段为例[J].生态学报,41(4):1332-1340.
- 戴文渊,郭武,郑志祥,等,2022.石羊河流域水生态安全影响因素及驱动机制研究[J].干旱区研究,39(5):1555-1563.
- 蒋忙舟,杨志,张晓明,等,2022.基于DPSIR模型的西北五省区水安全评价[J].地球科学与环境学报,44(3):535-544.
- 刘鹏,陈荣蓉,杨朝现,等,2017.基于“三生空间”协调的农村居民点布局优化研究[J].水土保持研究,24(2):283-288.
- 李德旺,王春芳,袁玉洁,2021.水生态监测国内外发展及在长江流域的应用思考[J].水生态学杂志,42(5):1-9.
- 李若飏,辛存林,陈宁,等,2022.三生空间视角下大夏河流域水生态安全评价与预测[J].水利水电技术(中英文),53(7):82-93.
- 牛最荣,王启优,孙栋元,等,2021.基于径流还现的洮河流域径流变化特征研究[J].干旱区地理,44(1):149-157.
- 彭建,赵会娟,刘焱序,等,2016.区域水安全格局构建:研究进展及概念框架[J].生态学报,36(11):3137-3145.
- 任潇潇,牛成英,2021.祁连山内陆河流域水资源安全评价及障碍因子诊断[J].湖北师范大学学报(自然科学版),41(3):42-49.
- 万生新,王悦泰,2019.基于DPSIR模型的沂河流域水生态安全评价方法[J].山东农业大学学报(自然科学版),50(3):502-508.
- 谢华晶,李克飞,李继清,等,2021.基于DPSIR模型的滇池流域水生态安全评价[J].环境保护科学,47(6):94-99.
- 左其亭,杨振龙,曹宏斌,等,2022.基于SMI-P方法的黄河流域水生态安全评价与分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),50(3):10-19,165.
- 左伟,王桥,王文杰,等,2002.区域生态安全评价指标与标准研究[J].地理学与国土研究,(1):67-71.
- 郑乐乐,马小雯,安翔,等,2022.基于DPSIR-GM(1,1)模型的甘肃省生态安全评价与预测[J].生态科学,41(4):60-69.
- 张洋,李鹏,杨志,等,2021.基于DPSIR模型的甘肃省2000-2018年水安全评价[J].水土保持通报,41(6):127-132,138.
- Gao Y, Jia J, Lu Y, et al, 2020. Progress in watershed geography in the Yangtze River Basin and the affiliated ecological security perspective in the past 20 years, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 30(6):867-880.
- Li X, Su X, Wei Y, 2019. Multistage integrated water security assessment in a typical region of Northwestern China[J]. Journal of Cleaner Production, 220:732-744.
- Li X, Xu Z, Fu Y, et al, 2021. Ecological Security Evaluation Algorithm for Resource-Exhausted Cities Based on the PSR Model[J]. Computers, Materials and Continua, 69(1): 985-1001.
- Ou Z R, Zhu Q K, Sun Y Y, et al, 2017. Regional ecological security and diagnosis of obstacle factors in underdeveloped regions: a case study in Yunnan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 14(5):870-884.
- Song G F, 2019. Evaluation on water resources and water ecological security with 2-tuple linguistic information[J]. International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems, 23(1):1-8.
- Tang Y, Zhao X, Jiao J, 2020. Ecological security assessment of Chaohu Lake Basin of China in the context of River Chief System reform[J]. Environmental Science and Pollution Research, 27(3):1-13.
- Yao J, Wang G, Xue B, et al, 2020. Identification of regional water security issues in China, using a novel water security comprehensive evaluation model[J]. Hydrology Research, 51(5):854-866.
- Zhang X, Vesselinov V V, 2017. Integrated Modeling Approach for Optimal Management of Water, Energy and Food Security Nexus[J]. Advances in Water Resources, 101:1-10.
- Zhu Y, He G, Zhang G, et al, 2021. Research on Spatio-Temporal Characteristics and Obstacle Diagnosis of Ecosystem Security in Huaihe River Economic Belt[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 30(6):5377-5389.

(责任编辑 郑金秀)

Water Ecological Security Evaluation and Diagnosis of Obstacles
in the Yangtze River Basin of Gansu Province from
the Perspective of Ecology–Life–Production Space

NIU Zui-rong, JIA Ling

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University,
Lanzhou 730070, P.R. China)

Abstract : Taking the Yangtze River basin in Gansu Province as the study area, we evaluated the status of water ecological security in the area and explored the driving factors affecting water ecological security from 2011 to 2020. The aim of the study was to provide scientific evidence for water resource management and allocation in Gansu Province. Based on water resource data for the study area (2011–2020), we developed a water ecological security evaluation system based on the pressure–state–response (PSR) model, including 24 indicators of ecology–life–production. The entropy method and comprehensive index method were then used to evaluate water ecological security, and the obstacle degree model to identify the primary obstacles affecting water ecological security. During the period from 2011 to 2020, the water ecological security status of the Yangtze River basin in Gansu Province changed from basic security, to less secure, and back to basic security. The highest comprehensive index value was 0.6123 in 2020 and the lowest value was 0.3341 in 2014. From the perspective of ecology–life–production, ecology, and production were more influential on the state of water ecological security from 2011 to 2020, with weight proportions of 36.37%, 36.12% and 27.51% for ecology, production, and life, respectively. From the perspective of pressure–state–response, the pressure and response systems were the primary drivers of water ecological security, with weight proportions of 35.45%, 31.20% and 33.36% for pressure, state, and response, respectively. The obstacle factors affecting the water ecological security changed by year, and the primary driving factors in the two most recent years were production space and the pressure system. In general, the water ecological security situation in the study area was good for the last 10 years. These results provide a scientific basis for water ecological protection and attaining regional high-quality in similar basins of the upper Yangtze River.

Key words : ecological–life–production space; pressure–state–response model; water ecological security; obstacle factors; Yangtze River basin of Gansu Province