

# 基于 SMI-P 方法的黄河流域水生态安全评价与分析

左其亭<sup>1a,b</sup>, 杨振龙<sup>1a</sup>, 曹宏斌<sup>2</sup>, 马军霞<sup>1a</sup>

(1. 郑州大学 a. 水利科学与工程学院; b. 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 郑州 450001;

2. 河南省豫北水利工程管理局, 河南 新乡 453002)

**摘要:**为了响应黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略,改善黄河流域水生态环境,亟须评估流域水生态安全状况,因地制宜保护与修复生态系统.选取黄河流域 62 个地级行政区,基于“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)模型选取 15 个指标构建评价指标体系,采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”(SMI-P)评价方法,计算 2009—2019 年流域各地级行政区水生态安全指数(Water Ecological Security Index, WESI),并采用空间自相关模型分析各地级行政区的水生态安全水平的集聚性特征和空间分布.结果表明,黄河流域水生态安全水平逐年上升,WESI 由 2009 年的 0.42 上升至 2019 年的 0.45,增幅达 7.14%,流域整体呈现四周高中间低的空间布局,近十年来流域 62 地级行政区的 WESI 具有明显的正相关性,且空间聚集程度呈现先上升后下降的趋势.

**关键词:**黄河流域;水生态安全;SMI-P 评价方法;空间自相关

**中图分类号:**TV213.4

**文献标志码:**A

流域水生态安全事关经济发展、社会稳定和人类健康,是指围绕人类社会实现可持续发展的目的,由经济、社会和水生态三者之间和谐统一构成的复杂生态安全系统.21 世纪以来,全球生态环境逐渐恶化,成为经济发展和城市现代化建设的阻碍因素,其中水生态安全问题更是亟须解决的问题,世界各国致力于解决由于水资源短缺与污染带来的全球性水危机<sup>[1-3]</sup>.水生态安全是生态安全格局的重要组成部分,保障水生态安全是全面建设生态文明建设的重要环节<sup>[4]</sup>.黄河流域作为我国重要的经济带和生态屏障,承担着经济生产和粮食主要产地的重任,但在经济发展中,水生态环境不可避免地受到了一定的影响,导致黄河流域水资源匮乏,洪涝灾害频发,水沙关系不协调等问题凸显<sup>[5]</sup>.通过水生态安全评价,可以明晰黄河流域制约因素,为流域水生态安全保护政策的制定提供支撑.

国内外学者对水生态安全的研究也逐渐系统化,20 世纪 80 到 90 年代,经济合作组织<sup>[6]</sup>(OECD)提出应用“压力-状态-响应”(PSR)模型以分析世界环境状况问题.在此之后,众多学者利用该框架进行流域生态健康评价<sup>[7-8]</sup>、土地安全评价等<sup>[9-10]</sup>.水生态安全评价的研究已较为深入,杨文斌等<sup>[11]</sup>对天目河沙湖水生态安全进行评价,得出其水体透明度下降是影响水库生态服务功能的主要原因,且水文气象条件的不确定性给水库生态安全带来了较大的不确定性.NIXDORF 等<sup>[12]</sup>从大型河湖系统监测评估、建模分析、数据方法等角度对流域水生态安全评价内容进行改善与优化.SOLOVJOVA 等<sup>[13]</sup>利用概率风险模型对北极区域海洋水生态安全进行评估,为协调海洋生态与经济发展之间的关系提供了一定的依据.文献<sup>[14]</sup>对亚马孙雨林潘塔纳尔湿地水生态安全进行评估,提出在生态系统服务的保护中必须要考虑水安全战略.然而,大多数研究都是以国家和省份等大尺度区域为研究区,缺乏对小尺度研究区水生态安全制约因素的明晰,导致研究结果虽具有宏观指导意义,但无法实际为小尺度研究提供指导性建议.不同区域的实际情况导致水生态安全问题不同,因此亟须细化研究区尺度,针对微观研究区进行剖析水生态安全制约因素.基于此,本文以黄河流域 62 个

收稿日期:2021-10-18;修回日期:2021-12-01.

基金项目:国家自然科学基金(51779230);河南省重大公益性科技专项(201300311500).

作者简介(通信作者):左其亭(1967—),男,河南固始人,郑州大学教授,博士生导师,博士,主要从事水文学及水资源研究, E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn.

地级行政区作为研究对象,评估水生态安全等级,并分析其空间分布特征,以期为黄河流域下一级尺度研究区恢复水生态安全提供一定的参考价值.

### 1 研究区概况及数据来源

#### 1.1 研究区概况

黄河流域发源于中国青海省巴颜喀拉山脉,流域从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区,是中国重要的生态屏障,也是中国极为重要的农业经济开发区,承担着粮食基地的重任.黄河流域工业基础发展迅速,自然资源储量丰富,为经济发展奠定了良好的基础.

黄河流域的气候特征特殊,具有温差悬殊、降水分布不均、沙尘暴较多等特点,水土流失严重、生态环境破碎、生物多样性降低等问题导致流域水生态安全具有一定的隐患.本文通过分析研究微观地级行政区的水生态安全评价,以期更好地明晰黄河流域水生态安全现状.通过阅读相关文献[15]、根据黄河水利委员会划分依据,利用 Arcgis 流域提取功能划分黄河流经的主要地级行政区,最终确定 62 个地级行政区作为本文研究区,具体研究城市如图 1 所示.

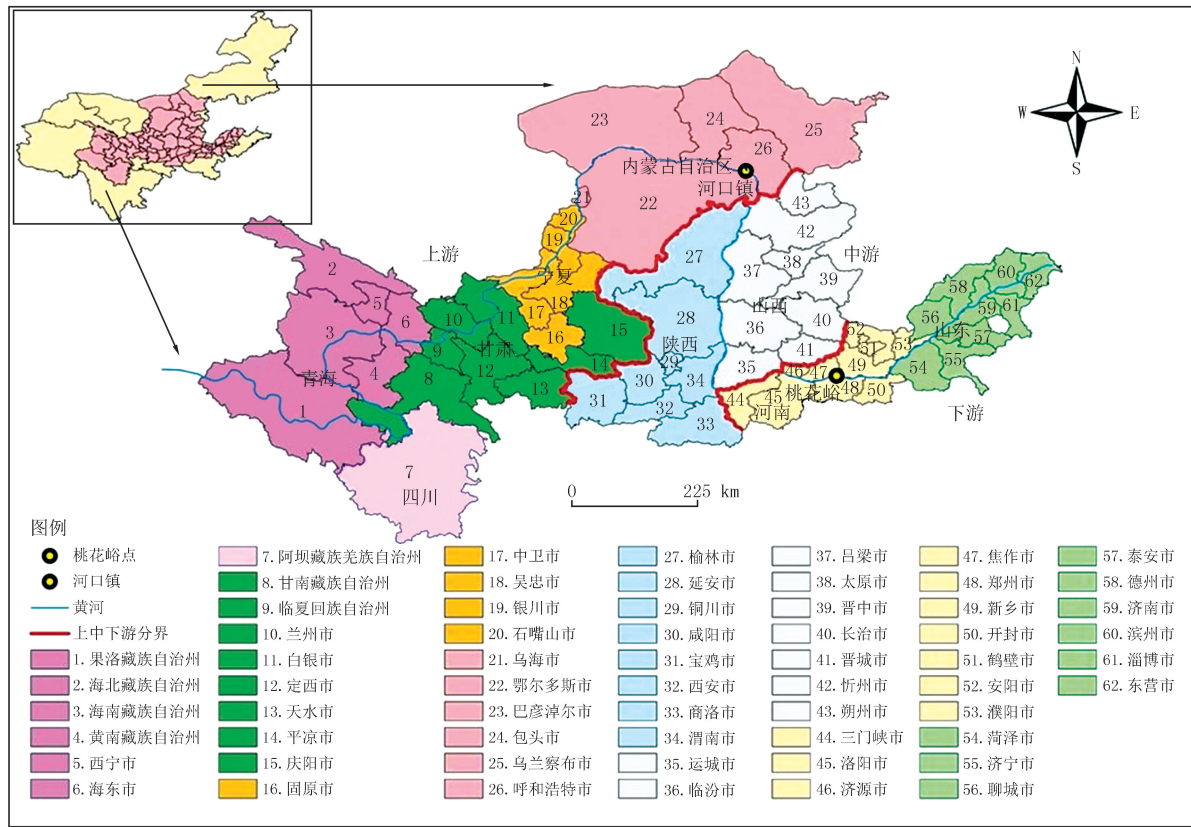


图1 黄河流域62个地级行政区

Fig. 1 62 prefecture level administrative regions in the Yellow River basin

#### 1.2 数据来源

本文选取 2009—2019 年间的指标数据,年降雨量、水域面积、集中饮用水水质达标率、工业企业废水排放稳定达标率等指标数据来源于各地级行政区《环境状况公报》《水资源公报》;人口密度、人口自然增长率、城镇用地比重、城镇生活污水集中处理率、建成区绿地率等指标来源于《中国城市建设统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》;耕地比重、万元 GDP COD 排放量、万元 GDP 氨氮排放量、NDVI(归一化植被指数)、水源涵养指数、湿地面积占总面积的比例等数据通过使用 Arcgis 10.6 软件提取数据并处理后获取.由于部分数据

资料缺乏,采用内插法对数据进行插补延长.

## 2 研究方法

### 2.1 构建指标体系

PSR 模型<sup>[16]</sup>是一种常用于衡量环境与可持续发展的评价指标体系模型,它从压力(P)、状态(S)、响应(R)3个维度构建指标体系,具有综合全面、灵活等优点,被广泛用于复杂的系统评价.构建科学、通用、全面的指标体系是保证评价结果准确的基础,在已有研究<sup>[17-18]</sup>的基础上,结合黄河流域实际情况构建了科学的水生态安全评价指标体系.压力因素主要包括气候条件、人口、经济、水资源方面在内的6个指标;状态维度涵盖水环境负荷、水生态、陆域生态、生态服务功能4个方面6个指标;响应层面则包含污染治理维度在内的3个指标.具体指标体系如表1所示.

表1 基于PSR框架的水生态安全评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water ecological security based on PSR framework

目标层	准则层	指标层	单位	类型
水生态安全指数	压力	年降雨量 $A_1$	mm	正向
		人口密度 $A_2$	人/ $\text{km}^2$	负向
		人口自然增长率 $A_3$	%	负向
		城镇用地比重 $A_4$	%	负向
		耕地比重 $A_5$	%	负向
		水域面积 $A_6$	$\text{km}^2$	正向
	状态	万元 GDP COD 排放量 $B_1$	kg/万元	负向
		万元 GDP 氨氮排放量 $B_2$	kg/万元	负向
		NDVI $B_3$	无量纲	正向
		集中饮用水水质达标率 $B_4$	%	正向
		水源涵养指数 $B_5$	%	正向
		湿地面积占总面积的比例 $B_6$	%	正向
	响应	工业企业废水排放稳定达标率 $C_1$	%	正向
		城镇生活污水集中处理率 $C_2$	%	正向
		建成区绿地率 $C_3$	%	正向

### 2.2 确定指标权重

进行水生态安全评价时,指标权重对最终评价结果的精准度有很大的影响.确定指标权重主要的方法分为主观赋权法和客观赋权法两种.主观赋权法可以反映指标间的重要程度,但是存在一定的主观性;客观赋权法主要反映数据显示的权重信息,缺少决策者的意识,可能会导致结果偏离现实.因此,综合考虑主观权重和客观权重,可以使得最终确定的指标权重更为合理.常用的主观赋权计算方法有层次分析法、专家打分法、满意度调查法等;客观赋权计算方法有熵权法、神经网络法、主成分分析法等.本文选取层次分析法与熵权法结合确定综合权重,详细计算步骤可见文献<sup>[19]</sup>.

### 2.3 水生态安全指数计算

对于多指标评价的方法比较丰富,比较常见的有灰色综合评价方法、物元分析方法、耦合协调方法等.在深入学习方法原理的基础上,结合多种方法的优势,笔者提出“单指标量化-多指标综合-多准则集成”评价方法(即“SMI-P方法”)<sup>[20]</sup>,该方法的具体步骤如下:

步骤 a 单指标量化:指标数据可按照其性质分为定性指标和定量指标两种,并且指标间的量纲与正负类型不完全相同,为了使计算结果更加精准,本文采用模糊隶属度法对单指标进行量化,该方法具有较强的灵活性和可比性,对各指标进行处理后将所有指标统一映射到 $[0,1]$ 范围上,用(1)和(2)式分别计算正向、负

向指标,具体计算公式如下:

$$\mu_k = \begin{cases} 0, & x_k \leq a_k, \\ 0.3 \left( \frac{x_k - a_k}{b_k - a_k} \right), & a_k < x_k \leq b_k, \\ 0.3 + 0.3 \left( \frac{x_k - b_k}{c_k - b_k} \right), & b_k < x_k \leq c_k, \\ 0.6 + 0.2 \left( \frac{x_k - c_k}{d_k - c_k} \right), & c_k < x_k \leq d_k, \\ 0.8 + 0.2 \left( \frac{x_k - d_k}{e_k - d_k} \right), & d_k < x_k \leq e_k, \\ 1, & e_k < x_k, \end{cases} \quad (k=1,2,3,\dots,n), \quad (1)$$

$$\mu_k = \begin{cases} 1, & x_k \leq e_k, \\ 0.8 + 0.2 \left( \frac{d_k - x_k}{d_k - e_k} \right), & e_k < x_k \leq d_k, \\ 0.6 + 0.2 \left( \frac{c_k - x_k}{c_k - d_k} \right), & d_k < x_k \leq c_k, \\ 0.3 + 0.3 \left( \frac{b_k - x_k}{b_k - c_k} \right), & c_k < x_k \leq b_k, \\ 0.3 \left( \frac{a_k - x_k}{a_k - b_k} \right), & b_k < x_k \leq a_k, \\ 0, & a_k < x_k, \end{cases} \quad (k=1,2,3,\dots,n), \quad (2)$$

式中,  $\mu_k$  为各指标的单指标量化值,  $x_k, a_k, b_k, c_k, d_k, e_k$  分别表示第  $k$  个指标的数值、最差值、较差值、及格值、较优值、最优值。

步骤 b 多指标综合: 准则层中包含多个可以反映水生态安全水平的指标, 为了综合考虑指标对水生态安全水平的影响, 全面获取指标数据带来的新信息, 采用多指标加权计算方法求得各准则层的隶属度, 具体计算公式如下:

$$WESI_t = \sum_{k=1}^n \omega_k \mu_k, \quad (3)$$

式中,  $WESI_t$  表示各准则层的得分水平,  $\omega_k$  表示各指标的权重, 由层次分析法与熵权法综合计算得到。

步骤 c 多准则集成: 依据步骤 b 计算的不同准则层的计算结果, 对各准则层隶属度进行加权求得最终水生态安全水平。

$$WESI = \sum_{t=1}^n \omega_t WESI_t, \quad (4)$$

式中,  $WESI$  为水生态安全水平, 本文构建压力-状态-响应模型, 3 个准则层对于生态安全评价同等重要, 因此 3 个准则层的权重同为  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \frac{1}{3}$ 。

参考文献[21]并结合黄河流域实际情况, 最终确定各个指标的 5 个特征值见表 2, 以黄河流域 62 个地级行政区的各指标的平均值作为及格值; 最优值取最高值扩大 10%, 最差值取最低值缩小 10%, 较优值与较差值通过线性内插确定。参考和谐等级划分标准<sup>[22]</sup>, 将水生态安全水平划分为 5 个等级, 具体分级见表 3。

## 2.4 空间自相关分析

本文采用空间自相关分析来研究黄河流域水生态安全水平的集聚性特征和空间布局特征。空间自相关分析是一种较为常用的空间统计方法, 可以分析某些指标在同一区域或不同区域间潜在的与邻近单位的联系。空间自相关包括全局自相关和局部自相关, 全局空间自相关可以分析水生态安全指数变化情况是否存在聚类分布, 而局部空间自相关用来分析水生态安全指数变化聚类的空间位置。



表 2 评价指标节点值

Tab. 2 Evaluation index node value

指标	最优值	较优值	及格值	较差值	最差值	指标	最优值	较优值	及格值	较差值	最差值
A <sub>1</sub>	1 128.16	784.48	440.80	234.22	27.63	B <sub>3</sub>	0.96	0.80	0.65	0.40	0.14
A <sub>2</sub>	1.90	167.26	332.63	958.52	1 584.41	B <sub>4</sub>	100	98.25	96.49	78.82	61.16
A <sub>3</sub>	-17.90	-5.53	6.81	24.75	42.68	B <sub>5</sub>	1 385.43	937.84	490.25	245.46	0.67
A <sub>4</sub>	0.02	3.1	6.27	16.58	26.89	B <sub>6</sub>	10.08	5.27	0.46	0.23	0.00
A <sub>5</sub>	0.03	20.16	40.29	66.81	93.32	C <sub>1</sub>	100.00	96.85	93.70	65.13	36.57
A <sub>6</sub>	3 555.84	1 969.69	383.54	197.05	10.56	C <sub>2</sub>	100.00	94.14	88.27	49.17	10.06
B <sub>1</sub>	0.06	0.63	1.20	7.68	14.16	C <sub>3</sub>	52.05	42.52	32.99	17.22	1.44
B <sub>2</sub>	0.01	0.06	0.12	0.66	1.20						

表 3 水生态安全等级划分标准

Tab. 3 Classification standard of water ecological security

WESI	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]
等级	非常危险	危险	警惕	较安全	安全

### 2.4.1 全局空间自相关

全局莫兰指数(Global Moran's I)<sup>[23]</sup>:全局空间自相关分析可以宏观地测度全区域要素值的聚合或者离散的程度,测度结果以莫兰指数表示,其取值范围为 $[-1,1]$ ,当莫兰指数大于0时,说明水生态安全水平呈现正相关关系;当莫兰指数小于0时,说明水生态安全水平呈现负相关关系;当莫兰指数等于0时,则不存在相关关系.借助 ArcGIS 和 GeoDa 软件,采用单变量全局空间自相关模型,构建 Queen 邻接空间权重矩阵计算黄河流域 62 地级行政区 2009 年、2014 年、2019 年水生态安全的全局莫兰指数,计算公式如下:

$$I_G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (5)$$

式中, $I_G$  表示全局莫兰指数, $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  个城市和第  $j$  个城市的水生态安全指数, $\bar{x}$  为全流域水生态安全指数平均值, $n=62$ , $\omega_{ij}$  表示空间权重矩阵, $S$  表示样本的方差值.

### 2.4.2 局部空间自相关

局部莫兰指数(Local Moran's I)<sup>[24]</sup>:局部莫兰指数可以进一步确定区域内部的要素值的空间聚集的位置,分析阐明水生态安全在空间上的聚集、异质或随机的分布特征.借助 GeoDa 软件,构建 Queen 邻接空间权重矩阵,利用局部莫兰指数公式计算,从局部考察黄河流域 62 个地级行政区的水生态安全空间聚集特征,将显著性通过检验的集聚区域绘制成 LISA 聚类图.具体计算公式如下:

$$I_L = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

式中, $I_L$  表示局部莫兰指数, $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  个城市和第  $j$  个城市的水生态安全指数, $\bar{x}$  为全流域水生态安全指数平均值, $n=62$ , $\omega_{ij}$  表示空间权重矩阵.

## 3 结果分析

### 3.1 黄河流域水生态安全水平分析

#### 3.1.1 时间维度分析

近十年来,黄河流域整体 WESI 呈现逐年上升趋势.基于(4)式计算得到黄河流域整体 2009—2019 年的

WESI 变化趋势见图 2. WESI 由 0.42(2009 年)波动上升至 0.45(2019 年),虽然呈现上升趋势,但是增幅缓慢,年平均变化率仅为 0.7%。黄河流域的生态治理虽已经取得了初步的成效,但是水生态安全等级仍没有明显的提升,仍处于警惕状态下。

2009—2012 年是水生态安全指数增幅较大的年份,增幅达到 1.4%,这是因为黄河流域各省份在国务院的指导下,实施《黄河流域防洪规划》,加强黄河流域基础设施建设,大力开展河道整治,加强水土保持,通过植树造林,退耕还田等措施减少流域水土流失,增强水源涵养指数,扩大湿地面积,进而使流域水生态环境得以修复,水生态安全指数呈现较大的增长趋势。2010—2011 年,黄河流域上游地区降水量增幅明显,流域水汽呈现辐射式增强趋势,降低了流域沙漠化风险,湿地面积与水源涵养能力都有一定的提升,水生态安全指数处于增幅较大的阶段,这与黄建平等<sup>[25]</sup>的研究具有一致性。2013—2019 年水生态安全指数基本维持原状,处于停滞不前的“瓶颈”状态。这是因为经过流域生态修复后,部分省份存在追求经济发展而忽略对生态环境的影响,在高速追求经济发展的同时,不可避免地造成了废弃物的排放,COD 和氨氮含量超标、部分地区水质达标率较低是制约水生态安全等级提升的主要因素。依据原始指标数据并结合各省份实际情况分析,大力推动城镇化发展的过程中,城镇周围的高质量耕地被占用,非生态用地盲目扩张,导致耕地面积、水域面积和生态用地面积减少严重,加剧了人与自然的矛盾,导致水生态安全指数停滞不前,这与卫新东等<sup>[26]</sup>对黄河流域生态用地格局变化分析的结果具有一致性。

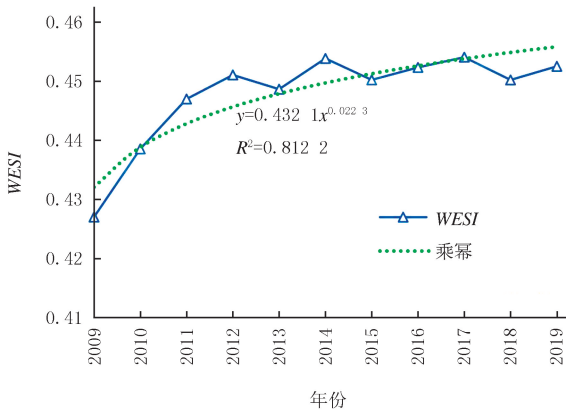


图2 黄河流域2009—2019年水生态安全指数

Fig.2 Water ecological security index of the Yellow River basin from 2009 to 2019

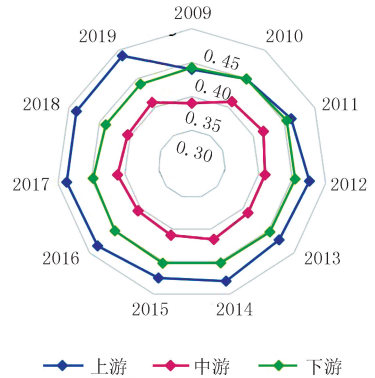


图3 黄河流域上、中、下游水生态安全指数

Fig.3 Water ecological security index of the upper, middle and lower reaches of the Yellow River basin

对黄河流域上、中、下游水生态安全指数计算分析,结果如图 3 所示,黄河流域上、中、下游水生态安全水平具有明显的区域性,上游地级行政区的 WESI 最高,下游次之,中游 WESI 最低。这也与黄河流域的经济发展重心和自然地理环境具有密不可分的联系。上游青海、甘肃等省份经济发展较为缓慢,主要为农业和畜牧业,对水环境的人为干预较少,自然环境优越,水源涵养能力较强,有良好的水环境基础。下游省份人口密集,对水环境的干预较为严重,高速的经济发展不可避免地对水环境造成一定的影响,但在发展经济的同时,逐渐意识到生态环境的重要性,较为注重对水环境的保护,因此下游省份 WESI 指数居中。中游省份 WESI 之所以最差,主要是因为中游地区的自然地理环境对水环境造成了一定的遏制,黄河流经黄土高原,使河流的含沙量骤增,进而水质下降,中游局部地区生态系统退化,草场面积减少,导致水源涵养功能降低,生态环境十分脆弱,从而使中游 WESI 处于危险边缘,所以黄河流域水生态安全治理的侧重点在于中游,为实现黄河流域生态保护与高质量发展,亟须改善中游地区生态环境。

### 3.1.2 空间维度分析

通过选取 2009 年、2014 年、2019 年 3 个代表年份,绘制黄河流域 62 个地级行政区 WESI 空间分布如图 4 所示,从图 4 中可以看出,流域的 WESI 存在明显的区域性,代表数值越大的颜色地区表示 WESI 越高。从整体上来看,上游城市的 WESI 等级较高,下游城市次之,中游城市最低,整体呈现一种四周水平较高,中间水平较低的格局。WESI 等级最高的区域主要分布在青海省、四川省、甘肃省和内蒙古自治区的西北部地

区.等级较低的地区主要集中在中部省份,白银、中卫等城市矿产资源丰富,资源产业的发展,污染地区水资源水质,降低土壤固水能力,水源涵养能力下降,导致水生态安全指数较低,处于危险边缘,奥勇等人<sup>[27]</sup>在研究分析中也指出矿产行业对于这些地区提升生态安全具有制约因素.

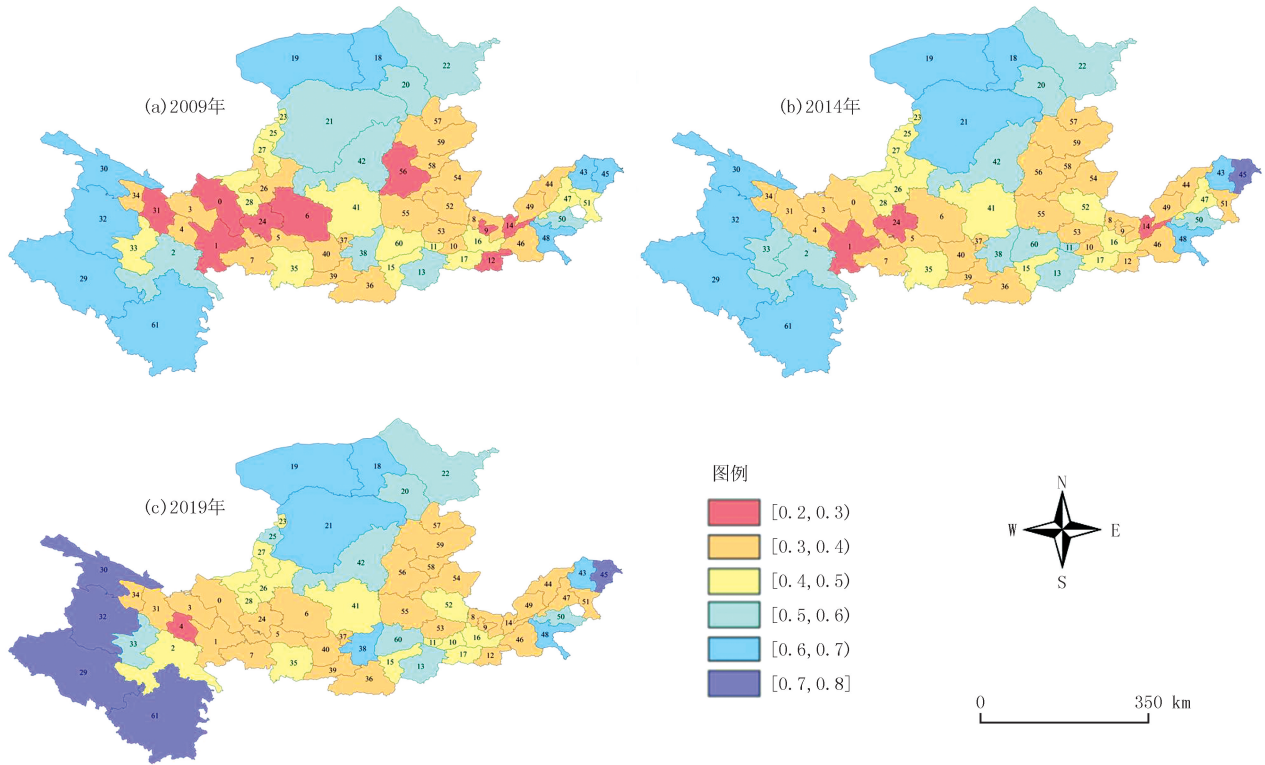


图4 黄河流域62个地级行政区水生态安全指数

Fig.4 Water ecological security index of 62 prefecture level administrative regions in the Yellow River basin

2009年,黄河流域有9个地级行政区 WESI 等级处于最低级别,分别为:海东市(0.292)、定西市(0.266)、白银市(0.288)、固原市(0.263)、庆阳市(0.293)、吕梁市(0.291)、开封市(0.295)、濮阳市(0.261)、鹤壁市(0.266),这9个城市处于危险等级,相关部门应及时改善本市水生态环境,否则有可能进一步恶化为非常危险等级.到了2014年,只有定西市(0.271)、濮阳市(0.288)、固原市(0.297)3个城市等级较低,但是较5年前也有明显提升,整个流域 WESI 处于向好趋势.由于近年来提出黄河流域高质量发展与生态保护战略,大力推行退耕还林政策,天然林保护力度加大,生态环境趋好<sup>[28]</sup>.到了2019年,上述9个城市已经脱离可能发展到非常危险的情况,阿坝藏族自治州、果洛藏族自治州、海北藏族自治州、海东市、东营市等城市水生态安全等级接近安全,未来可能达到安全等级.

### 3.2 黄河流域水生态安全空间变化特征分析

#### 3.2.1 全局自相关

由表4可知,黄河流域62个地级行政区在2009年、2014年、2019年的水生态安全的莫兰指数分别为:0.294 0、0.356 9、0.332 2,由3个年份的莫兰指数可以分析得到:黄河流域62个地级行政区的水生态安全水平在近十年的时间内的空间聚集程度呈现先上升后下降的趋势.2009年、2014年、2019年的水生态安全的莫兰

表4 单变量全局空间自相关分析结果

Tab.4 Univariate global spatial autocorrelation analysis results

参数	2009年	2014年	2019年
Moran's <i>I</i>	0.294 0	0.356 9	0.332 2
<i>P</i> -Value	0.001	0.001	0.001
<i>Z</i> -Value	3.895 3	4.661 6	4.323 2

指数通过了1%的显著性检验,*Z*值分别为3.895 3、4.661 6和4.323 2,均大于临界值1.96,证明其有统计学意义,表明在研究期间黄河流域62个地级行政区之间具有明显的空间正相关性,即水生态安全水平高的城

市其周围区域水生态安全水平也高,反之,水生态安全水平低的城市周围区域水生态安全水平也低。

### 3.2.2 局部自相关

从图5中可以分析得出:黄河流域62个地级行政区水生态安全等级主要以高一高、低一低聚类模式为主。2009年,低一低聚集主要分布在白银市、定西市、兰州市、平凉市、固原市、中卫市和太原市,高一高聚集主要分布在包头市、巴彦淖尔市、果洛藏族自治州;2014年,高一高聚集增添了鄂尔多斯市,低一低聚集的城市有白银市、定西市、兰州市、平凉市、天水市、新乡市和长治市;2019年高一高聚集的城市与2014年一致,没有发生改变,低一低聚集的城市较2014年增添了临夏回族自治区。

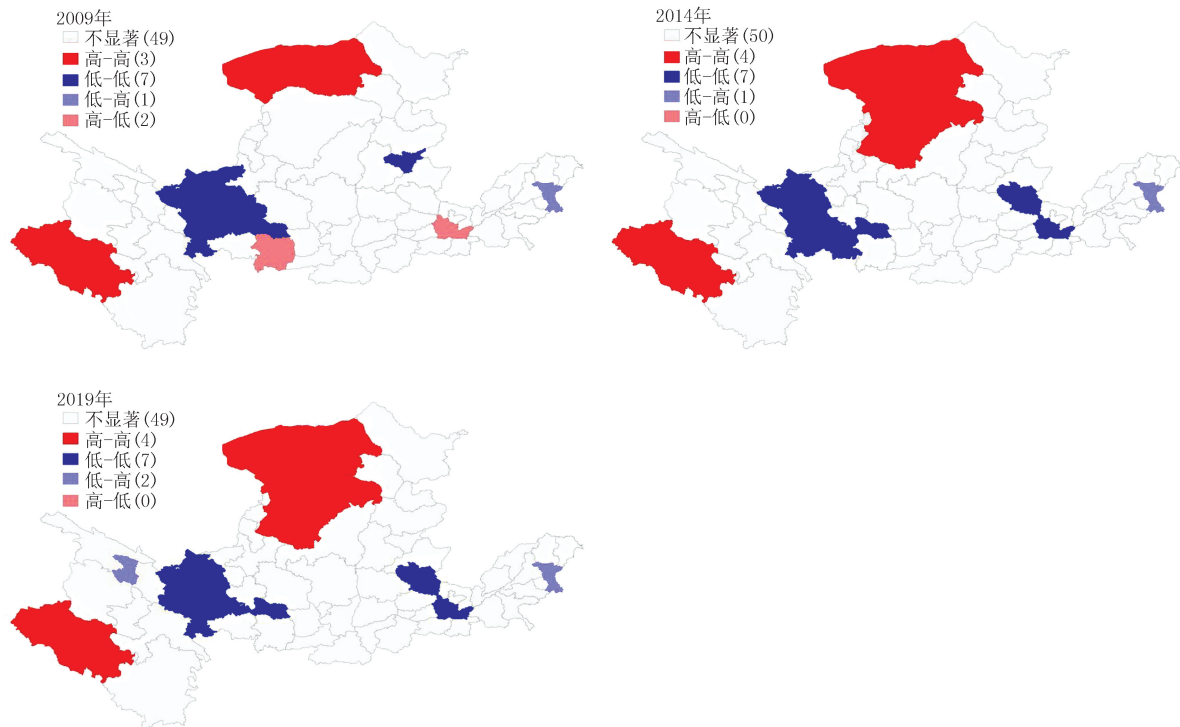


图5 黄河流域水生态安全指数LISA聚类图

Fig. 5 Lisa cluster diagram of water ecological security index in the Yellow River basin

依据水生态安全等级空间分布特征,各聚集区域地级行政区政府应采取不同措施:(1)在高一高聚集区采取保证水生态处于安全范围内的情况下,大力发展经济生产;(2)在低一低聚集区,相关部门和企业应提高对水生态安全的重视程度,加强水生态安全的保护力度,必要时可以关闭部分高排放企业,加大环保投资,为改善水生态环境制定严格的指导政策;(3)在其他聚集区,高值城市应总结本市保护水生态的经验,并分享给邻市,积极帮助周围低值省市改善水生态环境,低值市政府应加强水生态环境的治理,发展低能耗产业,加大环保投资力度。

## 4 结 论

2009—2019年,黄河流域62个地级行政区整体水生态安全水平逐年上升,但是增幅缓慢,年均增幅仅为0.7%,危险等级城市数量由32个降至30个。黄河流域整体呈现上游城市水生态安全水平最高,下游城市次之,中游城市最低的空间分布格局,流域周边城市安全等级较高,中部地区安全等级较低。2009—2019年间,黄河流域62个地级行政区水生态安全水平存在明显的空间正相关性,其中,高一高聚集区主要在青海省与内蒙古自治区;低一低聚集区主要分布于陕西省、宁夏回族自治区。

## 参 考 文 献

[1] PRAKASH A. The periurban water security problem: a case study of Hyderabad in Southern India[J]. Water Policy, 2014, 16(3): 454-469.



- [2] WANG X Q. Research and application of water pollution control technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 310(5): 052075.
- [3] 左其亭, 郝林钢, 刘建华, 等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 16-21.  
ZUO Q T, HAO L G, LIU J H, et al. Characteristics of water resources in "Belt and Road" district and its framework of water security system[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21.
- [4] 谷树忠, 胡咏君, 周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 2-13.  
GU S Z, HU Y J, ZHOU H. Ecological civilization construction: scientific connotation and basic paths[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 2-13.
- [5] 杨振龙, 左其亭, 姜龙, 等. 黄河流域九省区域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.  
YANG Z L, ZUO Q T, JIANG L, et al. Interaction mechanism between urbanization and ecological security in nine provinces of the Yellow River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 191-200.
- [6] ADRIAANSE A. Environmental policy performance indicators[M]. Netherlands: N.p., 1993.
- [7] HARTIG J H, FRANCOEUR S N, CIBOROWSKI J J H, et al. An ecosystem health assessment of the Detroit River and western Lake Erie[J]. Journal of Great Lakes Research, 2021, 47(4): 1241-1256.
- [8] 赵艳民, 秦延文, 马迎群, 等. 基于 PSR 的长江口生态系统的健康评价[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 207-212.  
ZHAO Y M, QIN Y W, MA Y Q, et al. Assessment of ecosystem health of the Yangtze River Estuary based on the pressure-state-response model[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 207-212.
- [9] 王一山, 张飞, 陈瑞, 等. 乌鲁木齐市土地生态安全综合评价[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 427-440.  
WANG Y S, ZHANG F, CHEN R, et al. Comprehensive ecological security assessment: a case study of Urumqi City[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 427-440.
- [10] XIAO X, CHEN Y, RUAN J H, et al. Land ecological security evaluation of underground iron mine based on PSR model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 111: 012004.
- [11] 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 等. 天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4739-4752.  
YANG W B, DUAN W X, CUI Y, et al. Long-term changes and drivers of ecological security in Shahe reservoir, China[J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4739-4752.
- [12] NIXDORF E, CHEN M, LIN H, et al. Monitoring and modeling of water ecologic security in large river-lake systems[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125576.
- [13] SOLOVJOVA N V. Ecological risk simulation assessment in marine ecosystems of the Arctic shelf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 169: 112577.
- [14] BERGIER I, ASSINE M L, MCGLUE M M, et al. Amazon rainforest modulation of water security in the Pantanal wetland[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 1116-1125.
- [15] 李宗梅, 马周琴, 聂芹, 等. 生态流域水文单元划分方法研究[J]. 水文, 2017, 37(5): 27-30.  
LI Z M, MA Z Q, NIE Q, et al. Method of ecological watershed partitioning[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 27-30.
- [16] HU X J, MA C M, HUANG P, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection-A case of Weifang City, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107464.
- [17] 司马文卉, 胡小凤, 沈占峰, 等. 大清河流域水生态安全评价指标体系构建[J]. 给水排水, 2021, 57(1): 90-95.  
SIMA W H, HU X F, SHEN Z F, et al. Water ecological safety evaluation index system of Daqing River Basin[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(1): 90-95.
- [18] 张晓岚, 刘昌明, 门宝辉, 等. 漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 626-630.  
ZHANG X L, LIU C M, MEN B H, et al. Establishing indicator system and evaluating ecological security in Zhangweinan River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2013, 49(6): 626-630.
- [19] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7.  
ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.
- [20] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] 刘建华, 黄亮朝, 左其亭. 黄河下游经济-人口-资源-环境和谐发展水平评估[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 412-422.  
LIU J H, HUANG L C, ZUO Q T. Evaluation of harmonious development of economy-population-resource-environment in the lower reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 412-422.
- [22] 阮君, 何刚, 王莹莹. 基于理想点-未确知测度理论的区域生态安全动态评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6951-6957.  
RUAN J, HE G, WANG Y Y. Dynamic assessment of regional ecological security based on ideal point-unascertained measurement theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6951-6957.

- [23] 赵聪佳,董晓光,王海帆,等.河南省粮食生产时空格局变化及其驱动因素[J/OL].河南农业大学学报:1-13[2021-11-28].DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.20210518.001.  
ZHAO C J,DONG X G,WANG H F,et al.Spatial-temporal pattern changes and its driving factors of grain yield in Henan Province[J/OL].Journal of Henan Agricultural University;1-13[2021-11-28].DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.20210518.001.
- [24] 高建岗,黄锐.基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J].水土保持研究,2019,26(3):213-218.  
GAO J G,HUANG R.Protection zoning of cultivated land based on cultivated land quality index and spatial autocorrelation on southern area of Jiangsu Province[J].Research of Soil and Water Conservation,2019,26(3):213-218.
- [25] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J].水利学报,2020,51(9):1048-1058.  
HUANG J P,ZHANG G L,YU H P,et al.Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1048-1058.
- [26] 卫新东,张健,王筛妮,等.黄河流域 2000—2020 年生态用地格局变化与分异趋势[J].生态学杂志,2021,40(11):3424-3435.  
WEI X D,ZHANG J,WANG S N,et al.The evolution and differentiation trend of ecological land pattern in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J].Chinese Journal of Ecology,2021,40(11):3424-3435.
- [27] 奥勇,蒋崮峰,白召弟,等.基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价[J].干旱区地理,2022,45(1):164-175.  
AO Y,JIANG L F,BAI Z D,et al.Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS[J].Arid Land Geography,2022,45(1):164-175.
- [28] 韩宇平,刘沛衡,王如厂,等.黄河宁夏段水生态环境保护与治理策略初探[J].华北水利水电大学学报(社会科学版),2021,37(3):1-6.  
HAN Y P,LIU P H,WANG R C,et al.Preliminary study on water ecological environment protection and management strategy in ningxia section of the Yellow River[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Social Science Edition),2021,37(3):1-6.

## Evaluation and analysis of water ecological security in the Yellow River basin based on SMI-P method

Zuo Qiting<sup>1a,b</sup>, Yang Zhenlong<sup>1a</sup>, Cao Hongbin<sup>2</sup>, Ma Junxia<sup>1a</sup>

(1. a. School of Water Conservancy Engineering; b. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordination Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Yubei Water Conservancy Engineering Administration Bureau, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** In order to respond to the strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin and improve the water ecological environment of the Yellow River basin, it is urgent to assess the water ecological security of the basin and restore and protect the ecosystem according to local conditions. In this paper, 62 prefect-level districts in the Yellow River basin were selected to construct a scientific index system based on the "pressure-state-response"(PSR) model with 15 indicators. The "single index quantization-Multiple index synthesis-Multiple criteria integration"(SMI-P) model was used to calculate the water ecological security index(WESI) of each district in the Yellow River basin from 2009 to 2019. The spatial autocorrelation model was used to analyze the clustering characteristics and spatial distribution of water ecological security level in each region. The results show that the level of water ecological security in the Yellow River basin increased year by year, and the WESI increased from 0.42 in 2009 to 0.45 in 2019, with an increase of 7.14%. The overall spatial layout of the Yellow River basin was high around and low in the middle. In the past ten years, the WESI of the 62 prefectural-level regions in the Yellow River basin had an obvious positive correlation, and the spatial aggregation degree showed a trend of rising first and then decreasing.

**Keywords:** the Yellow River basin; water ecological security; SMI-P evaluation method; spatial autocorrelation

[责任编辑 赵晓华 陈留院]

## 本期专家介绍



韩宇平,华北水利水电大学教授,博士,博士生导师.先后入选教育部新世纪优秀人才支持计划人选,河南省“科技创新杰出青年”人选,河南省学术技术带头人,华北水利水电大学首批“大禹学者”特聘教授.第六届中国水利学会青年科技工作者委员会副主任委员,中国水利学会水资源专业委员会委员,水利部发展研究中心特约研究员,兼任《人民珠江》杂志副主编,《南水北调与水利科技》《华北水利水电大学学报(自然科学版)》编委.现任华北水利水电大学水资源学院院长兼黄河科学研究院院长,黄河流域生态保护和高质量发展研究院办公室主任,河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室主任.主要从事水资源系统管理等方面的教学与研究工作.近年来主持完成包括国家自然科学基金项目、水利部“948”项目、水利部公益性行业专项资金项目等各类科研项目 40 多项,出版学术著作(译作)11 部,发表学术论文近 200 篇,其中 SCI/EI 检索论文 50 多篇,获省部级科技进步奖 7 项,发明专利 5 件,软件著作权 1 项.

左其亭,郑州大学教授,博士生导师.主要从事水资源与水环境的教学与研究工作.现任郑州大学水科学研究中心主任、黄河生态保护与区域协调发展研究院院长、河南省创新驱动发展研究院副院长、河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室主任、郑州市水资源与水环境重点实验室主任、河南省教学名师、全国优秀科技工作者、全国高校黄大年式教师团队负责人、国务院学位委员会学科评议组成员.兼任中国自然资源学会水资源专业委员会主任、国际水资源学会中国委员会常务理事、中国自然资源学会常务理事、中国水资源战略研究会理事、全球水伙伴中国委员会理事,以及多个专业委员会副主任委员和委员.主持国家自然科学基金重点项目 1 项、面上项目 4 项,国家社会科学基金重大项目 1 项、青年项目 1 项,国家基础科技专项课题 1 项以及其他研究项目 51 项,出版学术专著 18 部,发表学术论文 456 篇.



李仁辉,温州大学教授,温州市高层次引进人才 B 类杰出人才.1998 年取得日本筑波大学理学博士,1998 年 4 月至 2005 年 9 月分别在日本国立环境研究所,美国赖特州立大学,弗吉尼亚理工大学和田纳西大学从事博士后研究.2005 年 9 月入选中国科学院海外杰出引进人才“百人计划”.曾任中国科学院水生生物研究所藻类研究中心主任,二级研究员,博士生导师.研究的领域包括水体富营养化,有毒蓝藻水华和藻类异味,饮用水源地有害生物和污染物的检测以及水质安全保障等.主持和承担国家“973”课题,“十一五”,“十二五”和“十三五”国家水专项以及国家自然科学基金等国家级项目以及受委托横向项目 60 多项(其中国家自然科学基金 8 项),广泛开展同美国,日本,欧洲和澳大利亚的国际合作研究.受聘于多个省市的“蓝藻水华和饮用水问题及处理”的专家,担任中国藻类学会常务理事兼副秘书长,国际藻类杂志 *Phycologia* (SCI) 副主编, *Journal of Systematics and Evolution* (SCI) 的副主编, *Harmful Algae*, 《生物多样性》和《应用与环境生物学报》的编委等.发表学术文章 150 多篇,其中第一和通信作者的 SCI 文章 130 多篇,被引 3 300 多次, H 指数 34.