

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20220225

• 资源利用 •

# 基于水足迹理论的黄河流域水安全评价\*

邢霞<sup>1</sup>, 修长百<sup>1,2\*</sup>, 刘玉春<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学经济管理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农牧业科学院, 呼和浩特 010018)

**摘要** [目的] 对黄河流域水安全状况进行评价, 并探寻其有效改善措施是实现黄河流域高质量发展的关键。[方法] 文章基于水足迹理论从社会经济安全、农业用水安全、工业用水安全及生态用水安全4个层面构建黄河流域水安全评价模型, 以黄河流域为研究区域, 运用模糊综合评价法和熵权法, 选取2004—2017年9个省区11个指标, 分别对其水足迹、水安全状况及其影响因素进行分析。[结果] 黄河流域总体水足迹呈增加趋势, 农业水足迹在总水足迹中占比最大, 约92%; 黄河流域总体水安全状况呈现变好的趋势, 青海省水安全等级最高, 内蒙古水安全程度最差; 影响因素分析表明制约黄河流域水安全状况的主要因素为人均水足迹、农业用水效率以及灰水足迹强度, 9个省区水安全主要影响因素存在地区差异性特点。[结论] 9个省区应结合自身短板, 因地制宜, 制定最适合当地发展的用水战略和节水战略, 以适应黄河流域生态保护和高质量发展的目标需求。

**关键词** 水足迹 水安全评价 黄河流域 模糊综合评价法 熵权法

**中图分类号**: TV213 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9121[2022]02-0250-09

## 0 引言

作为我国重要的生态屏障和经济带, 黄河流域水资源是影响人口增长、经济发展乃至国家安全的根本因素<sup>[1]</sup>。由于“先天”自然生态脆弱性以及“后天”经济社会发展的迫切需要<sup>[2]</sup>, 黄河流域水资源供需矛盾日益突出, 水资源过度开采和水污染等问题交织的严峻局面持续存在<sup>[3]</sup>, 潜在水资源的进一步开发成为不可实现的目标, 水安全受到严重威胁。为此, 必须建立合适的评价指标, 制定有效的评价方法, 明确制约黄河流域水安全的主要因素, 并提出相应的对策, 治理水环境污染、解决水资源短缺, 以适应黄河流域生态保护和高质量发展的目标需求。

目前关于水安全内涵的解释较多, 尚未形成公认的定义认可。但普遍认为水安全包含两个方面。一是国家或地区利益不因洪涝灾害、干旱、河流改道和水资源的不平衡分布等自然生态特征受到严重影响<sup>[4]</sup>。二是从社会经济特征来看, 通过有效的水管理, 避免水资源短缺和水污染<sup>[5]</sup>, 以满足社会发展对水资源的合理需求。结合文献<sup>[5]</sup>, 研究总结水安全是指“社会经济—生态环境—水资源”系统的有机协调, 是数量和质量上足以维持社会经济增长和生态环境保护的水资源。

水安全评价是根据所选择和确定的科学合理的水资源安全度量指标对研究区域的水安全状况进行评价分析, 以保证水资源安全<sup>[6]</sup>。指标分析法是现阶段最常用的水安全评价方法。目前学术界关于水安全指标体系的构建尚未达成客观、统一的标准, 但多是基于水资源、生态环境以及社会经济等角度构建评价指标体系, 如刘秀丽和涂卓卓<sup>[7]</sup>从经济社会、水质状况和资源条件三个方面出发, 建立了包含17个指标的京津冀地区水环境安全评价体系。贾晓莉<sup>[8]</sup>等基于水资源子系统、水环境子系统和社会经济子系统, 建立

收稿日期: 2020-08-07

作者简介: 邢霞(1992—), 女, 山西阳泉人, 博士生。研究方向: 农村牧区发展、资源与环境经济

\*通讯作者: 修长百(1963—), 男, 内蒙古突泉人, 博士、教授。研究方向: 农牧业经济学和农村牧区综合发展研究。Email: cbxiu@126.com

\*资助项目: 太原科技大学科研启动基金项目“黄河流域沿线城市绿色低碳循环发展水平测度、演化及影响因素研究”(W20212010)

了水安全评价指标体系。随着水足迹被开发用于水安全评估<sup>[9]</sup>,部分学者尝试基于水足迹理论构建水安全评价指标体系。基于虚拟水的概念,水足迹被定义为特定时间内,某一区域或群体生产或消费的所有产品和服务所需要的水资源数量<sup>[10-11]</sup>,它可将“看得见的水”(实际用水)和“看不见的水”(虚拟用水)相结合,从而更全面地评价水资源利用状况,更为科学合理地揭示人类的社会活动给水安全带来的影响。目前,此类指数的有效例子为 Cai<sup>[12]</sup>等从社会经济安全、食品安全和生态安全3个准则层出发建立了基于水足迹指标的水安全评价模型,并将该模型应用于中国湖南省。

已有针对黄河流域水资源的相关研究主要聚焦于水资源利用效率<sup>[13-14]</sup>、水资源脆弱性<sup>[15]</sup>、水资源承载力<sup>[16]</sup>、水权交易制度<sup>[17]</sup>、水资源配置<sup>[18]</sup>以及饮水安全<sup>[19]</sup>等,而对于黄河流域水安全评价的研究相对较少,仅贾晓莉<sup>[8]</sup>等通过构建一个基于SPA和FAHP的水安全综合评价模型对黄河流域水资源能力和水环境状况进行评价,但该研究关于水安全影响因素的分析较为薄弱。鉴于此,文章基于水足迹理论构建黄河流域水安全评价指标体系,运用模糊综合评价法对2004—2017年黄河流域水资源安全状况进行评价,以期为调控水资源配置,缓解水资源供需矛盾,推进黄河流域国家战略进程提供参考依据。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 研究区域与数据

作为中华民族的“母亲河”,黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区,全长约5 464 km,流域面积达79.5万 km<sup>2</sup>,承载着全国12.5%的人口,是西北部和华北地区重要供水源头,因此研究其水安全具有十分重要的意义。

该文所需数据均来源于《中国环境统计年鉴》、黄河流域9个省区的统计年鉴、水资源公报。考虑到2004年以前部分地区缺乏关于“水资源利用”的相关指标数据,2018年部分地区缺乏“禽肉生产量”“污染物排量”等指标,故只选取2004—2017年的样本。个别缺失数据通过计算得到。单位农畜产品水足迹借鉴孙才志和张蕾以及刘梅等研究成果<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 水足迹测算

总水足迹的分解方法有两种,一种是将水足迹分为内部水足迹和外部水足迹两部分,其计算公式为:

$$WF_{total} = WF_{inside} + WF_{external} = WF_{agri} + WF_{indu} + WF_{life} + WF_{ecol} + WF_{import} - WF_{export} \quad (1)$$

式(1)中,  $WF_{total}$  为区域总水足迹,  $WF_{inside}$  为内部水足迹,即该区域居民在生产或服务过程中所消耗的水资源总量;  $WF_{external}$  为外部水足迹,即该区域进口的产品或服务所消耗的水资源量;  $WF_{agri}$  为农业水足迹,由各农产品单位产品虚拟水含量与其产量的相乘并求和所得;  $WF_{indu}$  为工业水足迹,  $WF_{life}$  为生活水足迹,  $WF_{ecol}$  为生态水足迹,考虑到工业产品品种繁多,虚拟水含量十分复杂以及生活和生态水足迹基本上都是实体水<sup>[22]</sup>,因此直接用实体需水量予以代替。  $WF_{import}$  为出口水足迹,  $WF_{export}$  为进口水足迹,分别采用万元GDP用水量与年出口贸易总值和年进口贸易总值相乘得到<sup>[23]</sup>。

另一种是将水足迹分为绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹3部分,其计算公式为:

$$WF_{total} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (2)$$

式(2)中,  $WF_{green}$  为绿色水足迹,指用于农作物、生物燃料以及林业产品的降水量<sup>[24]</sup>;  $WF_{blue}$  为蓝色水足迹,即灌溉用水及地表湖泊等水资源蒸发量<sup>[25]</sup>;  $WF_{grey}$  为灰色水足迹,指以现有水质标准和自然本底浓度为基准,稀释一定污染物所需淡水的体积<sup>[26]</sup>,用于评估人类活动用水造成的水污染程度<sup>[27-29]</sup>,其计算公式为:

$$WF_{grey} = \frac{\alpha \times Appl}{C_{max}(b) - C_{nat}(b)} + \max\left(\frac{L_{indu}(b)}{C_{max}(b) - C_{nat}(b)} - W_{ed(indu)}\right) + \max\left(\frac{L_{life}(b)}{C_{max}(b) - C_{nat}(b)} - W_{ed(life)}\right) \quad (3)$$

式(3)中,  $\alpha$  为氮肥的流失率;  $Appl$  为氮肥施用量,  $L_{indu}(b)$  为第  $b$  类污染物的工业排放负荷,  $L_{life}(b)$

第b类污染物的生活排放负荷， $W_{ed(indu)}$ 和 $W_{ed(life)}$ 分别为工业污水排放量和生活污水排放量， $C_{max(b)}$ 和 $C_{nat(b)}$ 分别为第b类污染物水质标准浓度和容纳水体本底浓度，该文污水污染物主要为化学需氧量(COD)和氨氮( $NH_4+-N$ )，以化学需氧量为主要污染物的 $C_{max} = 0.06\text{ g/m}^3$ ，以氨氮为主要污染物的 $C_{max} = 0.015\text{ kg/m}^3$ ，假设容纳水体本底浓度 $C_{nat}$ 均为0，农业灰水足迹选取氮肥作为水污染物，氮肥流失率选取全国平均水平7%。

### 1.2.2 水安全评价

(1) 指标体系构建：基于水足迹理论，参考水安全内涵的界定并遵循指标体系构建原则，建立黄河流域水安全评价指标体系，涉及经济社会、农业、工业和生态环境四个方面,共计11个指标，见表1。

表1 水安全评价指标体系

| 准则层    | 代码  | 指标      | 计算公式                 | 单位                |
|--------|-----|---------|----------------------|-------------------|
| 社会经济安全 | C1  | 人均水足迹   | 区域总水足迹/区域总人口         | m <sup>3</sup> /人 |
|        | C2  | 水足迹强度   | 区域总水足迹/区域GDP         | m <sup>3</sup> /元 |
|        | C3  | 水进口依赖度  | 进口水足迹/区域总水足迹         | %                 |
|        | C4  | 水资源匮乏度  | (总水足迹+出口水足迹)/区域水资源总量 | %                 |
|        | C5  | 水资源压力指数 | 总水足迹/区域水资源总量         | %                 |
| 农业用水安全 | C6  | 农业水足迹占比 | 农业水足迹/区域总水足迹         | %                 |
|        | C7  | 农业用水效率  | 粮食产量/农业水足迹           | kg/m <sup>3</sup> |
| 工业用水安全 | C8  | 工业水足迹占比 | 工业水足迹/区域总水足迹         | %                 |
|        | C9  | 工业用水强度  | 工业水足迹/工业产值           | m <sup>3</sup> /元 |
| 生态用水安全 | C10 | 生态水足迹占比 | 生态水足迹/区域总水足迹         | %                 |
|        | C11 | 灰水足迹强度  | 区域灰水足迹/区域GDP         | m <sup>3</sup> /元 |

(2) 评价标准的确定：将水安全评价指标划分为5个等级，依次分别为安全、相对安全、正常、相对不安全以及不安全。其中，人均水足迹和水足迹强度的评级标准参照Cai等<sup>[10]</sup>，进口依赖度、水资源匮乏度、水资源压力指数借鉴商庆凯等<sup>[23]</sup>。其余没有明确标准的指标，借鉴刘秀丽和涂卓卓的做法<sup>[7]</sup>，依照各指标历年数据的五分位数进行等级划分，各指标的各级分级标准值见表2。

表2 水安全指标评价标准

| 准则层    | 代码  | 指标      | 权重    | I级<br>安全 | II级<br>相对安全 | III级<br>正常 | IV级<br>相对不安全 | V级<br>不安全 |
|--------|-----|---------|-------|----------|-------------|------------|--------------|-----------|
| 社会经济安全 | C1  | 人均水足迹   | 0.101 | 700      | 600         | 450        | 300          | 150       |
|        | C2  | 水足迹强度   | 0.088 | 300      | 600         | 900        | 1 200        | 1 500     |
|        | C3  | 水进口依赖度  | 0.063 | 0.840    | 1.053       | 1.253      | 1.434        | 2.146     |
|        | C4  | 水资源匮乏度  | 0.096 | 0.333    | 0.997       | 1.414      | 2.367        | 4.758     |
|        | C5  | 水资源压力指数 | 0.093 | 0.324    | 0.983       | 1.396      | 2.338        | 4.701     |
| 农业用水安全 | C6  | 农业水足迹占比 | 0.090 | 85.979   | 89.140      | 90.111     | 91.000       | 92.532    |
|        | C7  | 农业用水效率  | 0.100 | 0.524    | 0.503       | 0.482      | 0.438        | 0.329     |
| 工业用水安全 | C8  | 工业水足迹占比 | 0.063 | 3.762    | 4.428       | 4.733      | 5.193        | 6.947     |
|        | C9  | 工业用水强度  | 0.063 | 0.002    | 0.004       | 0.005      | 0.006        | 0.009     |
| 生态用水安全 | C10 | 生态水足迹占比 | 0.101 | 1.628    | 0.984       | 0.712      | 0.546        | 0.305     |
|        | C11 | 灰水足迹强度  | 0.088 | 0.007    | 0.010       | 0.012      | 0.014        | 0.022     |

(3) 评价方法：模糊综合评价法是一种以模糊推理为主的定性与定量相结合、精确与非精确相统一的评价方法<sup>[30]</sup>。考虑到水安全评价中涉及大量的复杂现象和多种因素的相互作用，该文采用模糊综合评价进行分析，计算步骤如下。

第一步：隶属度函数的确定。

第一等级隶属度公式为:

$$r_{i,1} = \begin{cases} 1, & x_i \geq s_{i,1} \\ \frac{s_{i,2} - x_i}{s_{i,2} - s_{i,1}}, & s_{i,1} > x_i > s_{i,2} \\ 0, & x_i \leq s_{i,2} \end{cases} \quad (4)$$

第二、三、四等级隶属度公式为:

$$r_{i,k} = \begin{cases} 0, & x_i \geq s_{i,(j-1)} \text{ or } c_i \leq s_{i,(j+1)} \\ \frac{x_i - s_{i,(j-1)}}{s_{i,j} - s_{i,(j-1)}}, & s_{i,(j-1)} > x_i > s_{i,j} \\ \frac{s_{i,(j+1)} - c_i}{s_{i,(j+1)} - s_{i,j}}, & s_{i,j} > x_i > s_{i,(j+1)} \\ 1, & c_i = s_{i,j} \end{cases} \quad k=2, 3, 4 \quad (5)$$

最后一级隶属度公式为:

$$r_{i,5} = \begin{cases} 0, & x_i \geq s_{i,(n-1)} \\ \frac{x_i - s_{i,(n-1)}}{s_{i,n} - s_{i,(n-1)}}, & s_{i,(n-1)} > x_i > s_{i,n} \\ 1, & x_i \leq s_{i,n} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中,  $r_{ij}$ 表示第*i*个指标对第*j*( $j=1, 2, 3, 4, 5$ )个评价等级的隶属度函数,  $x_i$ 为指标*i*的数值,  $s_{ij}$ 为指标*i*的*j*级标准值。

第二步:权重确定。

首先对数据进行标准化处理,然后采用客观赋权法中的熵权法对指标体系进行赋权。

第三步:综合评价。

在前两步的基础上,采用加权平均法计算模糊子集的综合评价值。计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^{12} w_i * \sum_{j=1}^5 r_{ij} * S_j \quad (7)$$

式(7)中,  $w_i$ 为第*i*个指标的权重系数,  $S_j$ 为相对应的定量等级评价,设为5个等级,分别取值1~5。 $H$ 代表水安全所处的相对位置。

### 1.2.3 水安全影响因素评价

为了更好地识别各评价指标对水安全综合评价值的影响程度,针对性地制定和调整区域水资源管理措施,该文引入计算公式为:

$$q_i = \frac{w_i * \sum_{j=1}^5 r_{ij} * S_j}{H} \quad (8)$$

式(8)中,  $q_i$ 代表第*i*个指标对水安全综合评价值的影响程度,  $q_i$ 值越大,代表该因素对水安全的影响程度越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域水足迹计算结果

基于水足迹评价模型计算得出2004—2017年黄河流域水足迹值,结果如图1所示。黄河流域总水足迹在研究期内逐年增加,由2004年的478.23亿 $\text{m}^3$ /年上升到2017年的635.59亿 $\text{m}^3$ /年,增长33%。其中,农业水足迹占总水足迹的比例最大,历年平均占比约为92%,表明黄河流域农业用水在总水足迹中占据

主导地位。同时还可以看出,从2007年开始,农业水足迹不断增长,这意味着农业用水效率低下,而单位作物生产用水却在上升。工业水足迹历年平均占比为4%,且变化不明显,整体呈小幅上升趋势。生活水足迹历年平均占比为3%,表现出波动增长趋势,原因在于经济发展水平的提高和人民生活持续改善,生活用水需求量增加。生态水足迹占比较低,仅占0.7%,变化趋势为先升高再降低然后再升高,但总体呈升高态势,表明社会对生态环境健康良性发展的重视程度在增加。此外,还计算了灰水足迹,其占比略有波动,历年平均占比达到27%,反映出黄河流域环境污染压力较大,水污染仍然是黄河流域面临的一个严重问题。

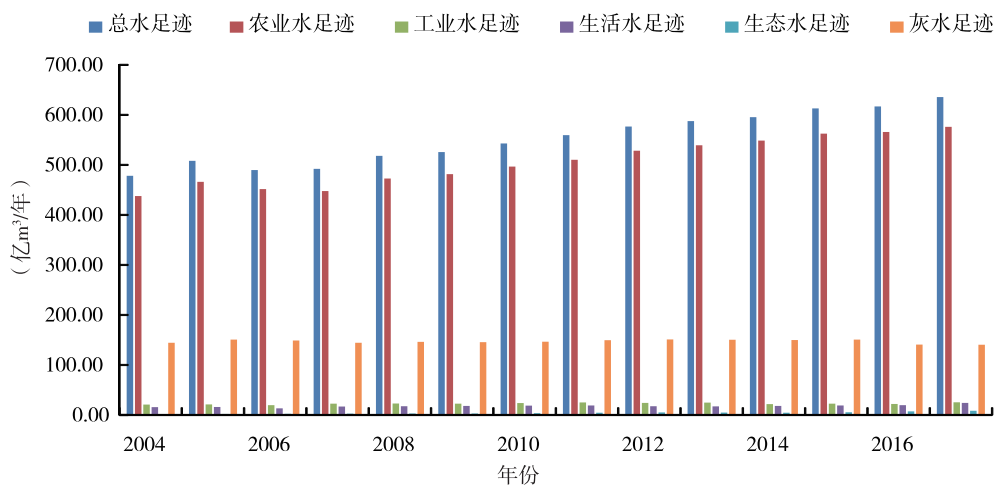


图1 2004—2017年黄河流域水足迹变化趋势

结合表3,从省际视角来看,山东、河南地处黄河流域中下游,该区域气候温暖湿润,地势平坦,土壤肥沃,是天然的农业生产基地,故而农业水足迹值最大,分别为1457.00亿m<sup>3</sup>/年和1121.21亿m<sup>3</sup>/年,水足迹总量居于9省的前列。近年来,四川省工业产业基础持续夯实,工业投资规模持续扩大,2019年工业增加值达1.3万亿,是名副其实的工业大省,但与之同时也导致耗水量增加,工业用水需求进一步加大,工业水足迹最高,为55.26亿m<sup>3</sup>/年。青海和宁夏受经济和自然资源的双重约束,农畜产品产量、工业用水比例、生活用水比例以及生态用水均低于其他各省区。山东和河南灰水足迹相对较多,分别为354.27亿m<sup>3</sup>/年和339.22亿m<sup>3</sup>/年,说明这两个省区由于人口密度较大,工业产业集聚,排放的生活污水和工业废水相对较多,污染物负荷相对较大,因此灰水足迹也相对较高,未来仍需强化水环境治理。

2.2 黄河流域水安全评价

基于模糊综合评价法,分别测算出2004—2017年黄河流域9个省区的水安全评价价值,评价结果如图2

| 表3 2004—2017年黄河流域各地平均水足迹 |          |          |       |       |       | 亿 m <sup>3</sup> /年 |
|--------------------------|----------|----------|-------|-------|-------|---------------------|
| 地区                       | 总水足迹     | 农业水足迹    | 工业水足迹 | 生活水足迹 | 生态水足迹 | 灰色水足迹               |
| 青海                       | 48.87    | 40.52    | 4.22  | 2.99  | 0.52  | 13.70               |
| 四川                       | 725.87   | 624.24   | 55.26 | 37.19 | 3.11  | 217.18              |
| 甘肃                       | 220.90   | 199.22   | 13.48 | 8.06  | 2.85  | 66.08               |
| 宁夏                       | 80.67    | 70.32    | 4.11  | 1.81  | 1.46  | 27.63               |
| 内蒙古                      | 572.19   | 527.91   | 21.40 | 15.18 | 11.57 | 118.17              |
| 陕西                       | 324.31   | 289.60   | 13.07 | 14.79 | 5.70  | 99.28               |
| 山西                       | 251.52   | 224.08   | 13.80 | 10.98 | 2.04  | 87.90               |
| 河南                       | 1 221.33 | 1 121.24 | 52.19 | 35.79 | 8.08  | 339.22              |
| 山东                       | 1 532.16 | 1 457.00 | 26.97 | 33.53 | 5.32  | 354.27              |

所示。由图2可知,2004—2017年黄河流域总体水安全评价价值逐年降低,并呈现出下降的趋势,表明水安全状况变好。从省际角度来看,各地水安全程度差异显著。根据水安全指标评价标准,报告期内,各地水安全评价价值包含3个等级。2004年有青海、四川和陕西3个省区综合评价价值低于3,处于第二等级,其余6个省区的水安全评价价值介于3~4,处于第三等级。2017年处于第三等级的省区减少至3个,分别为宁夏、内蒙古和河南。青海省水安全度最好,处于第一等级,其次是四川、甘肃、陕西、山西和山东,处于第二等级。第三等级中内蒙古水安全评价价值最高,为3.322,表明其水安全程度最差,是黄河流域水安全管理的重点地区。

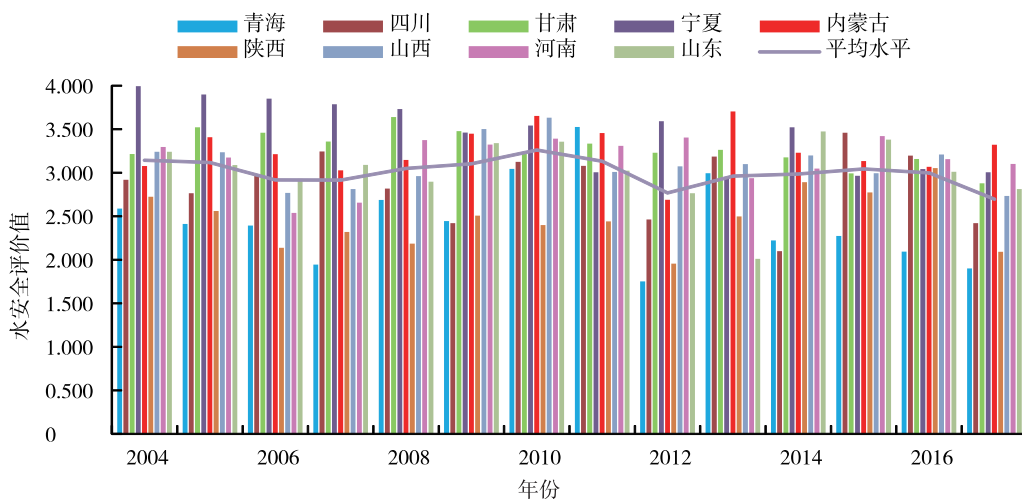


图2 2004—2017年黄河流域各地水安全评价

### 2.3 水安全影响因素分析

该文选取2004年和2017年为代表年份,根据上述公式分别计算得到各省区各项指标对水安全综合评价价值的影响程度并列前3位的指标(表4)。由表4可以看出,样本期内,对黄河流域整体水安全影响最广泛的因素是人均水足迹(C1),暗示了人口数量仍然是当前黄河流域水安全的一个主要制约因子,且随着人口数量的增多水安全程度有进一步恶化的趋势,未来可以考虑把控制人口数量作为提升水安全程度的突破口。其次是农业用水效率(C7)和灰水足迹强度。

具体来看,2004—2017年青海省排名第一的影响因素没有变,排名第二、第三的指标由灰水足迹强度(C11)和工业用水强度(C9)转变为生态水足迹占比(C10)和工业水足迹占比(C8),表明生态用水安全和工业用水安全是制约青海整体水安全的主要障碍因素。2004年四川省水安全影响最大的因素是人均水足迹(C1),其次是农业用水效率(C7)和灰水足迹强度(C11),到了2017年,生态水足迹占比取代了灰水足迹强度成为对四川影响排名第三的因素,其中灰水足迹强度所占比重由2004的15.08%下降到2017年的3.64%。甘肃省水安全主要影响因素排名变化较大,2004年影响最大的因素为农业用水效率(C7),占比为15.55%,2017年人均水足迹占比超过农业用水效率成为影响最大的因素,其次是生态水足迹占比(C10)和农业水足迹占比(C6)。

宁夏排名第一和第三的影响因素保持不变,排名第二的指标农业用水效率(C7)由生态水足迹(C10)取代,其中农业用水效率所占比由2004年的12.52%下降到2017年的6.06%,而生态水足迹占比却由2004年的7.4%上升至2017年的16.80%。内蒙古和河南较为类似,排名第一的是社会经济安全中的人均水足迹(C1),其次是农业用水安全和生态用水安全。2004年对陕西影响最大的因素是人均水足迹(C1),其次是灰水足迹强度(C11)和工业用水强度(C9),而对山西影响最大的因素是农业用水效率(C7),其次是人均水足迹(C1)和灰水足迹强度(C11)。2017年对两省影响程度排名前两位的因素相

同,均是人均水足迹(C1)和生态水足迹占比(C10),排名第三的因素分别是农业水足迹占比(C6)和水资源匮乏度(C4)。2004—2017年对山东省水安全影响最大的因素是人均水足迹(C1),其次是水资源匮乏度(C4)和农业用水效率(C7)。由上述分析可知,9个省区水安全主要影响因素存在地区差异性特点,各地区应准确把握这种差异性,提高用水政策制定的针对性,避免出现“一刀切”。

表 4 2004 年和 2017 年水安全主要影响因素及影响程度

| 地区 | 2004     |          |          |          |          |          | 2017     |          |          |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    | 1        |          | 2        |          | 3        |          | 1        |          | 2        |          | 3        |          |
|    | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 | 指标<br>代码 | 影响<br>程度 |
| 青海 | C1       | 19.51    | C11      | 16.11    | C9       | 12.17    | C1       | 25.97    | C10      | 25.97    | C8       | 8.88     |
| 四川 | C1       | 17.31    | C7       | 15.37    | C11      | 15.08    | C1       | 20.86    | C7       | 16.92    | C10      | 12.69    |
| 甘肃 | C7       | 15.55    | C1       | 15.21    | C11      | 13.69    | C1       | 17.54    | C10      | 17.54    | C6       | 15.63    |
| 宁夏 | C1       | 12.64    | C7       | 12.52    | C4       | 12.02    | C1       | 16.80    | C10      | 16.80    | C4       | 15.97    |
| 内蒙 | C1       | 16.41    | C6       | 16.42    | C11      | 14.30    | C1       | 15.20    | C10      | 15.20    | C7       | 15.05    |
| 陕西 | C1       | 18.54    | C11      | 16.15    | C9       | 11.57    | C1       | 24.15    | C10      | 17.90    | C6       | 14.70    |
| 山西 | C7       | 15.43    | C1       | 14.24    | C11      | 13.58    | C1       | 18.47    | C10      | 14.80    | C4       | 14.01    |
| 河南 | C1       | 15.33    | C6       | 13.55    | C11      | 13.35    | C1       | 16.29    | C7       | 16.08    | C10      | 15.40    |
| 山东 | C1       | 15.58    | C4       | 13.91    | C6       | 13.89    | C1       | 17.95    | C4       | 17.06    | C6       | 16.00    |

3 结论与讨论

3.1 结论

该研究基于水足迹理论,从社会经济安全、农业用水安全、工业用水安全以及生态用水安全4个层面构建了由11个指标组成的区域水安全评价体系。采用模糊综合评价法,以黄河流域为例,对其2004—2017年9个省区的水安全状况及其影响因素进行分析。主要结论如下。

(1)黄河流域总体水足迹呈增加趋势,农业水足迹在总水足迹中比重最大,约占92%,其次是工业水足迹和生活水足迹,占比分别为4%和3%,生态水足迹占比较低,仅占0.7%;从省际视角来看,山东、河南农业水足迹值最大,分别为1 457.00 亿 m<sup>3</sup>/年和1 121.21 亿 m<sup>3</sup>/年,四川工业水足迹最高,为55.26 亿 m<sup>3</sup>/年。受经济和自然资源的双重约束,青海和宁夏各水足迹均低于其他各省域。山东和河南灰水足迹相对较多,分别为354.27 亿 m<sup>3</sup>/年和339.22 亿 m<sup>3</sup>/年。

(2)基于水足迹理论的水安全评价分析表明黄河流域总体水安全状态呈现变好的趋势;青海省水安全等级最高,处于第一等级,其次是四川、甘肃、陕西、山西和山东,处于第二等级,宁夏、内蒙古和河南处于第三等级,其中内蒙古水安全评价价值最高,水安全程度最差。

(3)影响因素分析表明制约黄河流域水安全状况的主要因素为人均水足迹、农业用水效率以及灰水足迹强度,9个省区水安全主要影响因素存在地区差异性特点。

3.2 讨论

黄河流域水安全关系着国家的生态安全和经济社会可持续发展。特别是在黄河流域生态保护与高质量发展战略提出后,国家对黄河流域的水安全提出了更高的要求。为适应河流域生态保护和高质量发展的目标需求,各地要坚持生态优先、绿色发展、以水而定、量水而行的用水理念,结合自身用水短板,制定最适合当地发展的用水战略和节水战略。在科学计算的基础上,优化产业布局,改善用水结构,更有效地分配农业、工业和生活用水。如以农业用水为主导的山东、河南等地区应因地制宜,推广农业节水技术、农艺生物技术以及水肥一体化技术,在一定程度上挖掘农业用水效率,实现农业用水优化配置。以工业用水安全为主导的四川、陕西等省份应以技术改造为核心,创新工业发展模式,提高水资源的重

复循环利用率,同时调整工业发展布局,抑制高耗水行业发展。应对生态安全用水问题,当务之急是加强流域内污水治理,应建立并完善水资源安全监测信息管理平台,实现水量与水质的动态监管,对排污容量进行统一管理和分配,以降低耗水量与废水排放量。此外,要宣传绿色节水理念、节水知识,推进产品的水足迹标识,帮助企业和个人建立环保健康的生产消费意识,在全社会形成节水氛围。

该文的贡献在于:(1)水足迹反映了水资源在经济活动中的流动性,因此结合水安全定义与水足迹理论所构建的指标评价体系能更加科学合理地揭示人类的社会活动给水安全带来的影响。(2)最后,相比于目前较多的单一年份或单一省份水安全评估而言,基于多年份的、流域内的数据弥补了水安全评价中时间或空间维度上演变趋势研究的不足。(3)该文以黄河流域为例采用模糊综合评价法开展水安全评价研究,选择区域比较典型,针对流域特色水安全问题精准献策,可为黄河流域生态保护和高质量发展提供有益参考。

该文可能存在以下几点研究不足:第一,基于水足迹理论,重点考察了灰水足迹强度对水安全的影响,但未能详细分析工业污水排放量、生活污水排放量等具体指标的影响作用,同时也忽略了Ⅰ-Ⅲ类水质占比等反映水质量安全的指标。第二,限于数据的可获得性,该文选取了黄河流域9个省级行政区作为研究对象,区域选取尺度较大。完善的评价指标体系和更为精准的研究单元可为黄河流域水安全评估提供更为科学的理论支持和引导。在未来的研究中,需着重对这两个问题进行探讨。

## 参考文献

- [1] Grey D, Sadoff C W. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 2007, 9(6): 545-571.
- [2] 李小建,文玉钊,李元征,等.黄河流域高质量发展:人地协调与空间协调. *经济地理*, 2020, 40(4): 1-10.
- [3] 何爱平,安梦天.黄河流域高质量发展中的重大环境灾害及减灾路径. *经济问题*, 2020(7): 1-8.
- [4] Norman E, Bakker K J, Cook C, et al. *Water security: A primer*. Vancouver: University of British Columbia, 2010: 56.
- [5] Bakker K. Water security: Research challenges and opportunities. *Science*, 2012, 337(6097): 914-915.
- [6] 邵骏,欧应钧,陈金凤,等.基于水贫乏指数的长江流域水资源安全评价. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 889-894.
- [7] 刘秀丽,卓卓卓.水环境安全评价方法及其在京津冀地区的应用. *中国管理科学*, 2018, 26(3): 160-168.
- [8] Jia X, Cai Y, Li C, et al. An improved method for integrated water security assessment in the Yellow River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(8): 2213-2227.
- [9] Hoekstra A Y. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field. *Water Resources Management*, 2017, 31 (10): 3061-3081.
- [10] 宋智渊,冯起,张福平,等.敦煌1980—2012年农业水足迹及结构变化特征. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6): 133-138.
- [11] 焦士兴,张馨歆,王安周,等.水足迹视角下安阳市水资源利用与经济增长关系研究. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(12): 10-15.
- [12] Cai, J, He Y, Xie R, et al. A footprint-based water security assessment: An analysis of Hunan province in China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 245: 1-10.
- [13] 邢霞,修长百,刘玉春.黄河流域水资源利用效率与经济耦合协调关系研究. *软科学*, 2020(8): 44-50.
- [14] Zhang X, Kong Y, Ding X. How high-quality urbanization affects utilization efficiency of agricultural water resources in the Yellow River Basin under double control action? *Sustainability*, 2020, 12: 1-16.
- [15] 陈岩,冯亚中.基于RS-SVR模型的流域水资源脆弱性评价与预测研究——以黄河流域为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(1): 137-149.
- [16] 张宁宁,栗晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1759-1770.
- [17] Di D, Wu Z, Wang H, et al. Optimal water distribution system based on water rights transaction with administrative management, marketization, and quantification of sediment transport value: A case study of the Yellow River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 2020, 722: 1-16.
- [18] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究. *资源科学*, 2020, 42(1): 29-36.
- [19] 袁星,孔畅,王利,等.黄河流域农村饮水安全问题及对策. *资源科学*, 2020, 42(1): 69-77.
- [20] 孙才志,张蕾.中国农产品虚拟水—耕地资源区域时空差异演变. *资源科学*, 2009, 31(1): 84-93.
- [21] 刘梅,许新宜,王红瑞,等.基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1022-1034.
- [22] 张凡凡,张启楠,李福夺,等.中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 934-944.
- [23] 商庆凯,阴柯欣,米文宝.基于水足迹理论的青海省水资源利用评价. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 70-77.

- [24] Veetil A V, Mishra A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 589–602.
- [25] 樊慧丽, 付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 193–203.
- [26] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London, UK: Routledge, 2011.
- [27] Mayor B. An expert outlook on water security and water for energy trends to 2030–2050. *Water Policy*, 2016, 18 (1): 1–18.
- [28] Johnson M B, Mehrvar M. An assessment of the grey water footprint of winery wastewater in the Niagara Region of Ontario, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214(3): 623–632.
- [29] Vale R L, Netto A M, Xavier B, et al. Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234(10): 925–932.
- [30] 向梦杰, 方斌, 胡晓亮. 县域田园综合体选址评价与建设路径分析——以江苏省溧阳市为例. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(12): 161–170.

## WATER SECURITY ASSESSMENT OF YELLOW RIVER BASIN BASED ON WATER FOOTPRINT THEORY \*

Xing Xia<sup>1</sup>, Xiu Changbai<sup>1,2\*</sup>, Liu Yuchun<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

**Abstract** Evaluating the water security of the Yellow River Basin and exploring its effective improvement measures is the key to achieving high-quality development in the Yellow River Basin. Based on the water footprint theory, this paper constructed a water security rating model from four aspects of social and economic security, agricultural water security, industrial water security and ecological water security. Based on the Yellow River Basin as the research area, using fuzzy comprehensive evaluation method and entropy weight method, this paper selected 11 indicators of 9 provinces from 2004 to 2017 to analyze their water footprint, water security status and their influencing factors. The results showed that: (1) The overall water footprint of the Yellow River Basin was increasing, and the agricultural water footprint accounted for 92% of the total water footprint. (2) The water security status of the Yellow River Basin was showing a trend of improvement. Qinghai province had the highest water security level and Inner Mongolia had the worst water security. (3) The analysis of influencing factors showed that the main factors restricting the water security of the Yellow River Basin were per capita water footprint, agricultural water use efficiency, and gray water footprint intensity. The main factors affecting water security in 9 provinces had regional differences. Based on the above analysis, this paper suggests that the nine provinces should combine their own shortcomings and adjust measures to local conditions to formulate the most suitable water use strategy and water-saving strategy for local development, so as to meet the target demand of ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

**Keywords** water footprint; water security assessment; Yellow River Basin; fuzzy comprehensive evaluation method; entropy weight method