

基于结构熵权的黄河上游水资源 脆弱性模糊综合评价

胡 珺^a, 李春晖^b, 贾俊香^a, 夏星辉^b

(北京师范大学 环境学院 a. 水沙科学教育部重点实验室; b. 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 从水资源脆弱性产生的内部因素和外部因素两方面考虑建立水资源脆弱性评价指标体系。利用结构熵权法, 定性分析与定量分析相结合确定指标权重, 结合模糊综合评价法评价了黄河上游水资源脆弱性。结果表明: 从河源到河口镇水资源内部脆弱性逐渐明显, 由于各省区社会经济及供水不同, 水资源脆弱性综合评价表现为一定的差异性。

关键词: 结构熵权法; 水资源脆弱性; 水资源综合评价; 黄河上游

中图分类号: TV211.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0017-06

Fuzzy comprehensive evaluation of water resources vulnerability based on structure entropy weight method in upper reaches of the Yellow River basin

HU Jun^a, LI Chunhui^b, JIA Junxiang^a, XIA Xinghui^b

(a. Key Lab of Water and Sand Science of Ministry of Education; b. State Key Laboratory of

Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The water resources vulnerability system reflects the internal and external factors of the vulnerability of water resources. Structural entropy method, which combines qualitative analysis with quantitative analysis, was used to determine the index weight, and then was combined with fuzzy comprehensive evaluation method to assess the vulnerability of water resources in the upper reaches of the Yellow River. The results showed that the internal water resources vulnerability gradually becomes serious from Heyuan to Hekou Town; because of the differences of socio-economic and water supplies among provinces, the comprehensive evaluation results of water resources vulnerability were different.

Key words: structure entropy weight method; water resources vulnerability; water resources evaluation; upper reaches of the Yellow River basin

0 前 言

在气候变化以及极端天气事件增加的背景之下, 水资源系统不稳定性愈加明显, 尤其是近十年来, 不合理开发利用水资源的现象日趋严重, 水资源供需矛盾日益加剧, 已经成为制约社会发展的重要因素, 目前水资源及其脆弱性是水资源研究的热点问题之一^[1-2]。国内水资源脆弱性研究始于20世纪90年代, 不少学者在水资源脆弱性的概念、内涵、定量评估等方面做了一些有益的工作, 但总体来说, 尚处在起步阶段^[3]。目前通用的水资源脆弱

性的定义为水资源系统易于遭受人类活动, 自然灾害威胁和损失的性质和状态, 受损后难以恢复到初始状态和功能的性质^[4]。许多学者在其定义的基础上做了进一步研究^[3,5-7]。

目前, 已经有一些国家层次的水资源脆弱性相关的指标体系的研究, 分别从人类福利^[8-9]、社会发展^[10-11]、生态环境^[12-13]以及水资源可利用^[14-17]等方面建立相关的评价指标。国内学者根据不同区域水资源特点, 建立了许多水资源脆弱性相关的指标体系^[3,5,18-19]。总体而言, 可将水资源脆弱性指标体系大致分为三类: ①基于水质和水量两方面建立的脆

收稿日期: 2012-07-01; 修回日期: 2012-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB951104)

作者简介: 胡 珺(1987-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面研究。

弱性指标体系^[7];②根据脆弱性成因,从自然脆弱性、人为脆弱性以及承载脆弱性为基础建立指标体系^[5];③从经济学角度考虑,建立基于水资源供需驱动力的水资源脆弱性指标体系^[17,19]。

现行的水资源脆弱性评价的方法很多^[20]。其中模糊综合评价法由于使用方便,系统性强,结果清晰可靠,得到了广泛的应用。但模糊综合评价法中权重的确定对与评价结果至关重要。目前,确定指标体系权重的方法一般可分为主观赋值法和客观赋值法两大类。主观赋值法可以在一定程度上有效地确定各指标按重要程度给定的权重系数的先后顺序,但客观性较差,这样就会造成评价结果可能由于个人的主观因素而形成偏差。客观赋值法确定的权重大多数情况下精度较高,但有时会与实际情况相悖,对所得到的结果难以给出明确的解释。尤其是当原始数据信息量小时,所得出的权重结果与实际情况会产生较大偏差。研究表明,结构熵权法能够将定性定量相结合,减少由主观因素产生的偏差,从而提高结果的可靠性^[21],是确定权重的一种重要方法。本研究将根据黄河上游水资源特点、开发利用现状、以及社会经济发展,考虑水资源脆弱性产生的内部自然承载因素和外部压力驱动因素,建立指标体系,采用结构熵权法和模糊综合评价法,对黄河上游水资源脆弱性进行评价,为水资源规划和管理提供决策支持。

1 研究区概况

黄河上游为源头到内蒙古自治托克托县区河口

镇,流域范围贯穿青海省、四川省、甘肃省、宁夏和内蒙古五个省、自治区。上游河段全长 3 472 km,流域面积 38.6 万 km²,流域面积占全黄河总量的 51.3%。河段汇入的较大支流(流域面积 1 000 km²以上)43 条,其中主要支流有湟水和洮河,径流量占全河的 54%;上游河段年来沙量只占全河年来沙量的 8%,水多沙少,是黄河的清水来源。

2 黄河上游水资源脆弱性评价指标体系

黄河上游水资源脆弱性产生的内部因素主要包括:水资源稀缺程度、气候因素、水环境因素等;外部因素主要包括:社会经济发展水平、农业发展状况、供水强度等。在遵循科学性、整体性、动态性与静态性结合以及定性定量结合的原则下,充分考虑区域水资源特点、社会经济发展、水资源开发利用程度以及当地科技文化水平的差异性,根据黄河上游 5 省的水资源现状和数据收集情况建立指标体系如表 1。

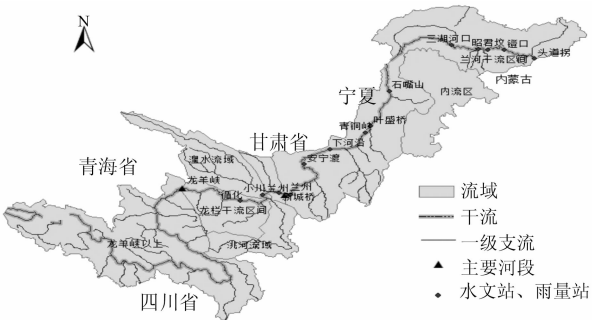


图 1 研究区概况

表 1 黄河上游水资源脆弱性评价指标体系 m³/人, mm, 万 m³/km², %, 万元/人, m³/万元

目标层	评价指标(准则层)	指标计算式	指标含义	指标类型
内部因素	人均水资源量	水资源总量/总人口	反映水资源量的多少,度量区域水资源稀缺程度	正向
	降水量	年降雨量	反映水资源量的多少	正向
	产水模数	水资源总量/总面积	反映水资源量的多少	正向
	地下水资源模数	区域地下水资源量/区域土地面积	反映地下水资源量的多少	正向
	水土流失面积比率	水土流失面积/流域面积×100%	反映水土流失情况	逆向
	达标河段比例	综合评价水质达标河长/总评价河长×100%	反映水功能区河段综合水质状况	正向
	生态环境用水比例	生态环境用水量/总用水量×100%	反映生态系统用水保障情况	正向
外部因素	人均 GDP	GDP 总量/总人口	反映区域整体经济状况	正向
	水资源利用率	耗水量/水资源量×100%	反映水资源开发利用状况	逆向
	万元工业产值用水量	工业用水量/工业产值	反映用水节水效率、经济用水水平	逆向
	供水模数	总供(用)水量/供水面积	反映区域供水强度	正向
	人均供用水量	总供(用)水量/总人口	反映区域人均供水水平	正向
	有效灌溉覆盖率	有效灌溉面积/耕地面积×100%	反映区域农业灌溉水平	正向
	农业用水比例	农业用水量/总用水量×100%	反映农业用水水平,反映区域用水结构	逆向

3 评价方法

3.1 结构熵权法的权重确定

结构熵权法是将专家调查法与模糊分析法相结合,形成“典型排序”,对“典型排序”。按照给定的熵决策公式进行熵值计算“盲度”分析,以减少“典型排序”的不确定性^[21]。具体步骤如下:

(1)典型排序。将专家分成 k 组采集意见,通过征询和反馈,最终形成 k 组“排序意见”。

(2)“盲度”分析。专家“典型排序”的意见会因数据“噪声”产生潜在偏差和溯源数据的不确定性。因此,需要运用熵理论计算其熵值,减少指标“典型排序”定性判断的不确定性。①设每组典型排序对应一个指标集,记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。指标集对应的“典型排序”数组,记为 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ 。取 $\{1, 2, \dots, n\}$ 自然数中的任意一个数。由 k 组典型排序表组成的指标排序矩阵记为 $A = (a_{ij})_{k \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n$)。其中 a_{ij} 表示第 i 组典型排序中第 j 个指标 u_j 的评价。②对“典型排序”定性、定量转化,定义定性排序转化的结构熵函数:

$$\chi(a_{ij}) = -\lambda p_i(a_{ij}) \ln p_i(a_{ij}) \quad (1)$$

$$\chi(a_{ij}) = -\frac{(m - a_{ij}) \ln(m - a_{ij})}{(m - 1) \ln(m - 1)} + \frac{m - a_{ij}}{m - 1} \quad (2)$$

$$\chi(a_{ij}) \left/ \frac{m - a_{ij}}{m - 1} \right. = -\frac{\ln(m - a_{ij})}{\ln(m - 1)} + 1 \quad (3)$$

其中,取 $m = n + 2$,令 $p_i(a_{ij}) = \frac{m - a_{ij}}{m - 1}$,取 $\lambda = \frac{1}{\ln(m - 1)}$ 。

由于信息熵是用来度量指标数据的效用价值,当 a_{ij} 的取值越小是其重要性越高, $\chi(a_{ij}) \in (-1, 0]$ 。当 a_{ij} 取值为1时, $\chi(a_{ij}) = 0$,当 a_{ij} 取值越大其绝对值越大。为了便于计算,并保持其原有属性,定义 b_{ij} 为指标的信息效用价值。

$$1 - \chi(a_{ij}) / \left(\frac{m - a_{ij}}{m - 1} \right) = b_{ij} \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{\ln(m - a_{ij})}{\ln(m - 1)} \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n)$$

b_{ij} 是定义在 $[0, 1]$ 上的变量,为 a_{ij} 对应的隶属函数值。 $B = (b_{ij})_{k \times n}$

③定义指标排序过程中由认知产生的不确定性为“认识盲度”记作 Q_j 。

$$b_j = (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{kj}) / k \quad (6)$$

$$Q_j = \frac{1}{k} \{ [\max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j] +$$

$$[\min(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j] \} / 2 \quad (7)$$

(3) 指标权重计算。

① 计算指标评价向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$x_j = b_j(1 - Q_j), x_j > 0 \quad (8)$$

② 权重计算 $W^* = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$

$$\alpha_j = x_j / \sum_{j=1}^n x_j \quad (9)$$

$$\text{满足 } \sum_{j=1}^n \alpha_j = 1。$$

3.2 模糊数学综合评判

模糊综合评判中将有关的模糊概念用模糊集合表示,然后进入评判的运算过程,通过模糊运算获得模糊集合表示的评价结果^[22]。

4 黄河上游水资源脆弱性评价

4.1 黄河上游水资源脆弱性综合评价

在综合考虑我国各区域的水资源状况及目前相应的经济社会发展水平的基础上,结合发达国家的用水水平,我国的相关标准及要求,将评价指标划分为5个等级(表2)。

①结构熵权法权重的确定。选取国内水文水资源、水环境、生态等研究领域的专家16位,分为4组,对黄河上游水资源脆弱性内部因素和外部因素指标分别进行典型排序。得到内部因素矩阵 A_1 和外部因素矩阵 A_2 。

$$A_1 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 6 & 7 & 5 & 4 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 7 & 6 \\ 1 & 4 & 2 & 3 & 6 & 7 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 3 & 5 & 1 & 6 & 7 \\ 6 & 3 & 1 & 7 & 2 & 4 & 7 \\ 6 & 2 & 3 & 4 & 1 & 5 & 7 \\ 7 & 4 & 1 & 3 & 2 & 6 & 5 \end{pmatrix}$$

由式(5)~(9)式计算得到权重为:

内部因素权重:

$$W_1^* = (0.2030, 0.1827, 0.1555, 0.1312, 0.1303, 0.0887, 0.1087)$$

外部因素权重:

$$W_2^* = (0.1065, 0.1699, 0.1921, 0.1266, 0.2036, 0.1235, 0.0779)$$

水资源脆弱性内部因素和外部因素指标是水资源脆弱性自然承载能力和压力驱动能力的表现形式,而水资源自然承载能力的多少是水资源可持续发展的决定因素,根据结构熵权法权重计算,确定目

标层权重值。

目标层权重 $W^* = (0.6131, 0.3869)$

②黄河上游 2006 - 2010 年水资源脆弱性评价结果。黄河上游水资源脆弱性评价,由《黄河流域水资源公报》及黄河流域水利委员会提供的基础数据进行整理,根据结构熵权法计算各项指标权重与模糊矩阵的乘积,得出 2006 - 2010 年各河段分省区的准则层评价结果(图 2、3)和综合评价结果(图 4)。

表 2 黄河上游水资源脆弱性评价标准		$\text{m}^3/\text{人}$, mm , $\text{万 m}^3/\text{km}^2$, $\%$, $\text{万元}/\text{人}$, $\text{m}^3/\text{万元}$				
评价指标	指标单位	不脆弱	较不脆弱	中等脆弱	较脆弱	非常脆弱
内部因素	人均水资源量	>800	$650 \sim 800$	$500 \sim 650$	$350 \sim 500$	<350
	降水量	>1200	$800 \sim 1200$	$400 \sim 850$	$100 \sim 400$	<100
	产水模数	≥ 50	$35 \sim 50$	$20 \sim 35$	$5 \sim 20$	<5
	地下水资源模数	≥ 5.5	$4 \sim 5.5$	$2.5 \sim 4$	$1 \sim 2.5$	<1
	水土流失面积比率	<10	$10 \sim 25$	$25 \sim 40$	$40 \sim 60$	<60
	达标河段比例	≥ 80	$65 \sim 80$	$50 \sim 65$	$35 \sim 50$	<35
	生态环境用水比例	≥ 3.6	$2.7 \sim 3.6$	$1.8 \sim 2.7$	$0.9 \sim 1.8$	<0.9
外部因素	人均 GDP	≥ 1.6	$1.4 \sim 1.6$	$1.2 \sim 1.4$	$1 \sim 1.2$	<1
	水资源利用率	<1	$1 \sim 2$	$2 \sim 3$	$3 \sim 4$	≥ 4
	万元工业产值用水量	<30	$30 \sim 60$	$60 \sim 90$	$90 \sim 120$	≥ 120
	供用水模数	≥ 16	$12 \sim 16$	$8 \sim 12$	$4 \sim 8$	<4
	人均供用水量	≥ 800	$600 \sim 800$	$400 \sim 600$	$200 \sim 400$	<200
	有效灌溉覆盖率	≥ 40	$30 \sim 40$	$20 \sim 30$	$10 \sim 20$	<10
	农业用水比例	<55	$55 \sim 65$	$65 \sim 75$	$75 \sim 85$	≥ 85

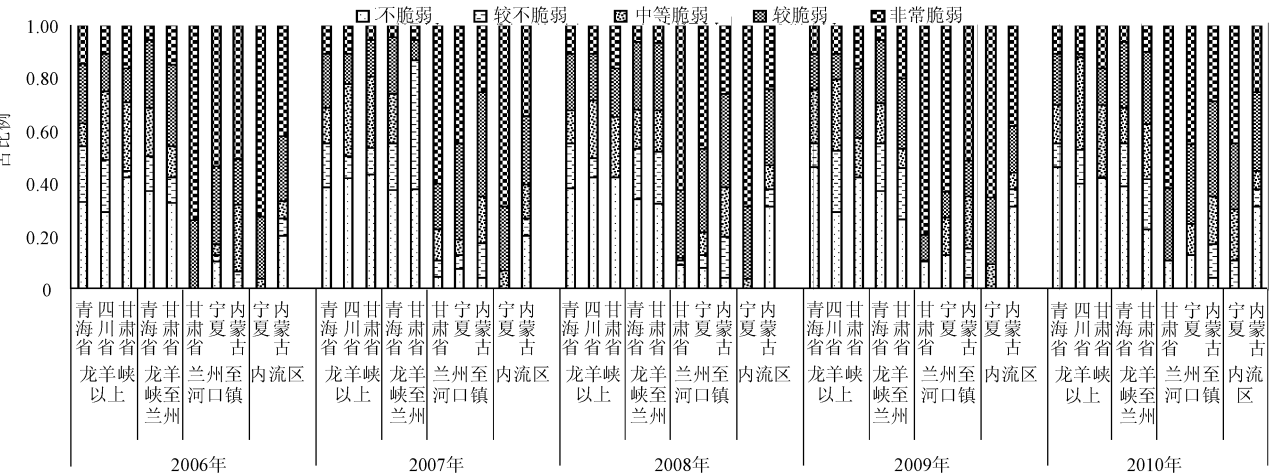


图 2 黄河上游脆弱性内部因素评价结果

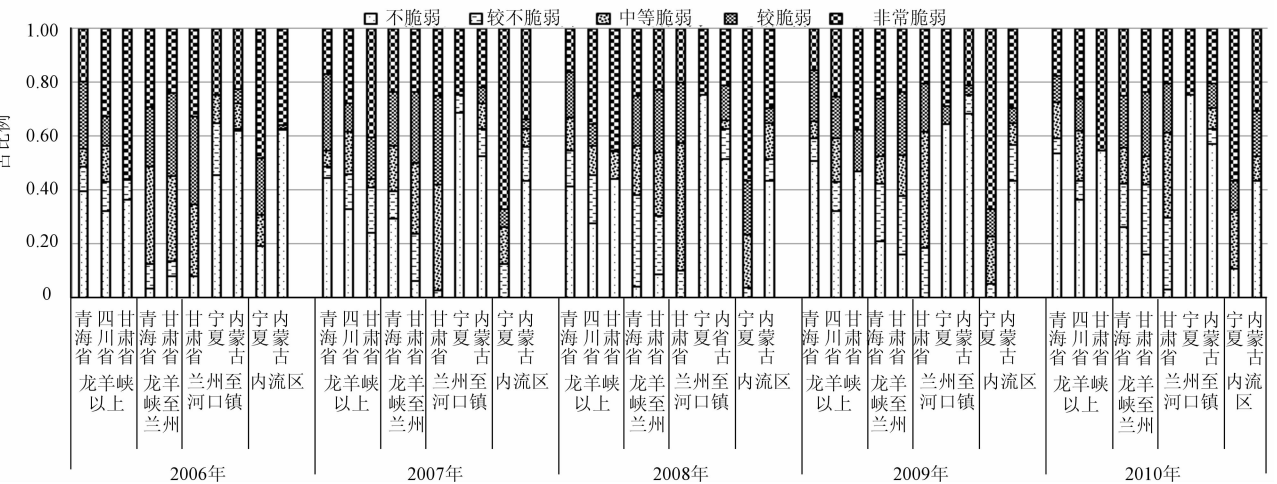


图 3 黄河上游脆弱性外部因素评价结果

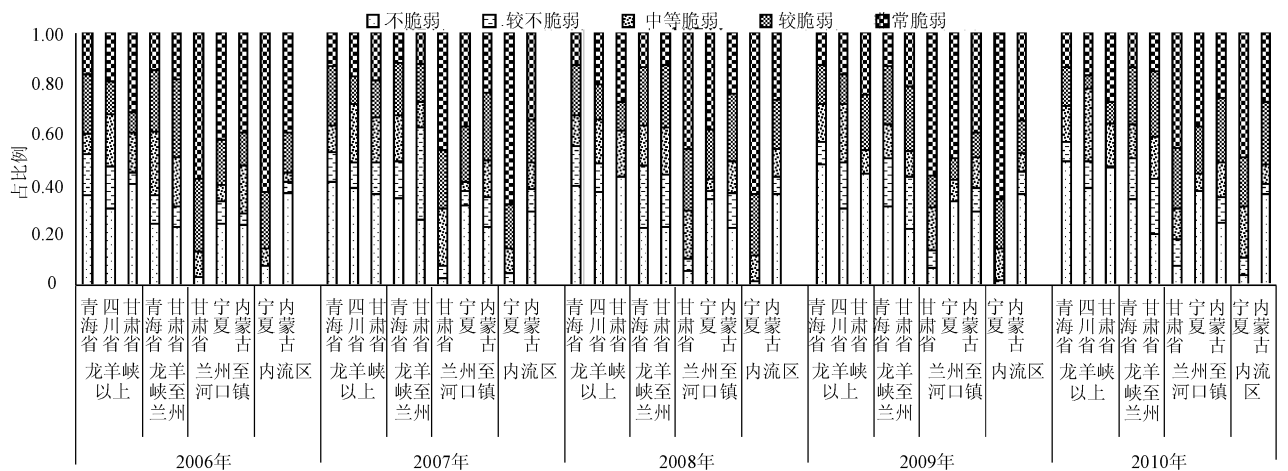


图 4 黄河上游综合评价结果

结果表明:龙羊峡以上水资源脆弱性评价结果为不脆弱;龙羊峡至兰州河段青海省多为不脆弱,甘肃省内部的自然承载脆弱性日益明显,综合评价结果为较脆弱。兰州至河口镇河段水资源内部非常脆弱;在外部驱动力的影响下,甘肃省部分为非常脆弱,宁夏和内蒙古部分在非常脆弱和较脆弱级别中有所反复。内流区水资源内部非常脆弱,在外部驱动力作用下区域差别较大,综合评价结果宁夏为非常脆弱,内蒙古结果有所反复,非常脆弱、较脆弱和不脆弱均占一定比例。

4.2 黄河上游水资源脆弱性评价结果分析

黄河流域上游部分从上至下水资源内部脆弱性逐渐凸显,而外部脆弱性在人口密集区和经济水平偏低的区域更加明显。总体来看,各河段不同区域其脆弱性表现各不相同。

龙羊峡以上河段横跨青海省、四川省和甘肃省。青海省由于人口密度相对较小,水资源富足,海拔高,受到人为因素的影响较少,水资源总体表现出良好的可持续性。四川省内黄河流域部分主要为阿坝州境内,水资源自然脆弱性和生态脆弱性均不明显,由于该区域社会经济发展水平较低,社会经济脆弱性值得关注,总体观之,水资源脆弱性总体表现为不脆弱。甘肃省境内的水资源内部表现为不脆弱,但受到人均供用水水平、用水结构和用水效率等因素的影响,2006 - 2008 年承载脆弱性较为明显,随着用水结构的调整,其承载脆弱性逐渐减弱。总体脆弱性评价结果良好。

龙羊峡至兰州河段涵盖了青海省和甘肃省。由于受到降水量的影响,甘肃省 2009 和 2010 年水资源内部脆弱性表现明显。随着人口密度的增加龙羊峡至兰州河段较龙羊峡以上河段,受到外部承载压

力因素影响明显增加,其主要表现在水资源利用率明显提升。总体而言,青海省脆弱性表现不明显,而甘肃省则表现为较脆弱。

兰州至河口镇河段,受到外部的影响因素逐渐增加。在水资源内部脆弱性方面,甘肃省、宁夏和内蒙古均呈现出资源型、工程型和水质型缺水现象,水资源内部脆弱性非常明显。外部因素方面,甘肃省总体表现为中等脆弱性,宁夏和内蒙古由于产业结构和经济量大,总体表现为不脆弱。由于现行的支柱产业为资源型产业,伴随着产业结构的调整,水资源脆弱性的问题会逐渐突出。

内流区位于河套平原以南青铜峡以东鄂尔多斯地区。由于该地区的地势高,气候干燥,蒸发量大,属于严重缺水区域,自然脆弱性和生态环境脆弱性极为明显。由于内蒙古地区经济用水水平和经济状况抵消了部分水资源内部脆弱性,综合结果呈现出不脆弱、较脆弱性与非常脆弱的两极分化。宁夏地区综合结果仍为非常脆弱。综合内流区水资源脆弱性评价结果表明水资源脆弱性仍然是该区域发展的重要限制因素之一。

综合黄河上游水资源内部脆弱性表现为:沿流域由上至下脆弱性问逐渐明显;由人口稀疏地区至人口密集地区脆弱性逐渐增加;河段间差异明显,河段内不同省区差距较小。水资源外部脆弱性表现为:上下游河段没有明显的变化趋势,而各省之间的差距较为明显。总体而言,黄河源区水资源脆弱性不明显,而进入黄土高原后水资源短缺和人为干扰逐渐突出。由于社会经济水平的不同,经济发达地区改善供用水水平,在一定程度上缓解水资源短缺,表现出了对自然脆弱性的抵抗性,经济水平较低的地区水资源脆弱性问题十分突出。

5 结 语

(1) 结构熵权法能够综合不同专家的评价结果,将定性分析结果定量化,是一种有效的定性定量相结合的权重确定方法。综合结构熵权法与模糊综合评价法能够客观的评价出黄河上游水资源脆弱性现状,得到与实际相符的评价结果。

(2) 研究将水资源脆弱性分为内部因素和外部因素两部分进行考虑,评价了黄河上游水资源的脆弱性,表现为从河源至河口镇其内部脆弱性逐渐明显。外部因素方面各省区所表现的情况有所差异,其结果存在一定的差异性。由于黄河上游水资源受到气候变化影响明显,尤其体现在降雨、气温和融雪等方面,以后的研究可以将更多的气候因素纳入水资源脆弱性评价体系中。

参考文献:

- [1] 李凤霞,郭建平. 水资源脆弱性的研究进展[J]. 气象科技,2006,34(6):731-734.
- [2] 赵信峰. 平原区水资源评价及可持续利用研究[D]. 西安:长安大学,2010.
- [3] 张笑天,陈崇德. 漳河水库灌区水资源脆弱性评价研究[J]. 华北水利水电学院学报,2010,32(2):12-15.
- [4] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报,2002,22(2):41-44.
- [5] 冯少辉,李靖,朱振峰,等. 云南省滇中地区水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护,2010,26(1):13-16.
- [6] 邹君,刘兰芳,田亚平,等. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. 资源科学,2007,29(1):92-98.
- [7] 邹君,杨玉蓉,谢小立. 地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报,2007,27(2):132-135.
- [8] Adger W N, Brooks N, Bentham G et al. New indicators of vulnerability and adaptive capacity[R]. Technical Report 7, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, 2004.
- [9] UNDP(United Nations Development Programme). Human development report-2005. [EB/OL][2012-04-21]. http://hdr.undp.org/en/media/hdr05_complete.pdf.
- [10] Sullivan C A. The potential for calculating a meaningful water poverty index[J]. Water International, 2001, 26: 471-480.
- [11] Sullivan C A, Meigh J R. Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated indicator approach: the example of the climate vulnerability index[J]. Water Science Technology (Spec Issue Clim Change), 2005, 51(5):69-78.
- [12] SOPAC "Pacific Islands Applied Geoscience Commission" Building resilience in SIDS, the environmental vulnerability index[EB/OL][2012-04-21]. <http://www.vulnerabilityindex.net/Files/EVI%20Final%20Report%202005.pdf>.
- [13] WEF(World Economic Forum). Environmental sustainability index. An initiative of the global leaders of tomorrow task force[C]//. World Economic Forum Annual Meeting 2002, Yale Center for Environmental Law and Policy, 2002.
- [14] Pandey R P, Pandey A, Galkate R V, et al. Integrating hydro-meteorological and physiographic factors for assessment of vulnerability to drought[J]. Water Resources Management, 2010, 24:4199-4217.
- [15] WRI(World Resources Institute). Watersheds of the world: an assessment of the ecological value and vulnerability of the world's watersheds[R]. World Resources Institute, Washington DC, 1998.
- [16] Gleick P H. Basic water requirements for human activities: meeting basic needs[J]. Water International, 1996, 21(2):83-92.
- [17] Sullivan C A. Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25: 627-640.
- [18] 刘恒,耿雷华,陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展, 2003, 14(3):265-270.
- [19] 周亮广,梁虹,黄法苏. 基于AHP方法的贵州省水资源供需评价与分析[J]. 水利经济, 2007, 25(1):16-19.
- [20] 阮本清,韩宇平,王浩,等. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. 水利学报, 2005, 36(8):906-912.
- [21] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7):1225-1228.
- [22] 王丽丽. 模糊数学法结合层次分析法用于清洁生产潜力评估研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.