

## Assessment and Threshold Value Analysis of Water Resources Vulnerability in Hexi Corridor\*

Zhifei Li<sup>1</sup>, Baohui Men<sup>1</sup>, Shifeng Zhang<sup>2</sup>, Xiuqing Meng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Renewable Energy Institute, North China Electric Power University, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing  
Email: shuiwenmi@126.com

Received: Sep. 12<sup>th</sup>, 2013; revised: Oct. 19<sup>th</sup>, 2013; accepted: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2013

**Abstract:** Because water ecological problems of Hexi Corridor in China are becoming more and more serious, it is very important to study water resources vulnerability of this area. Firstly, we construct water resources vulnerability assessment index system based on the Pressure-State-Response (PSR) model. Secondly, we use the fuzzy clustering method to draw cluster centers of the PSR indicators and use analytic hierarchy process to calculate the index weight value. Finally, we evaluate water resources vulnerability in Hexi Corridor in the status year of 2010 and the comparison year of 2003; we acquire the vulnerability threshold based on two different development models. The results show that water resources vulnerability in Hexi Corridor is 68.24, belonging to heavy fragile state; water resources vulnerabilities in Hei River, Shule River basin, and Shiyang River basin are heavy fragile fragile state; Hei River, Shule River basin, and Shiyang River basin's vulnerabilities aggravated orderly; the upper limit threshold value of water resources vulnerability in the research area is 89.07, belonging to very fragile state; the lower limit threshold value is 30.76, belonging to slightly fragile state.

**Keywords:** PSR Index System; Fuzzy Clustering; Hexi Corridor; Water Resources Vulnerability; Threshold Value

## 河西走廊地区水资源脆弱性评价及阈值分析\*

李智飞<sup>1</sup>, 门宝辉<sup>1</sup>, 张士锋<sup>2</sup>, 孟秀敬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学可再生能源学院, 北京

<sup>2</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 北京  
Email: shuiwenmi@126.com

收稿日期: 2013年9月12日; 修回日期: 2013年10月19日; 录用日期: 2013年10月22日

**摘要:** 我国河西走廊地区水生态问题引人关注, 对该地区水资源脆弱性评价和脆弱性阈值分析具有十分重要的研究意义。首先利用压力-状态-响应(pressure-state-response, 简称PSR)框架, 构建水资源脆弱性指标体系; 其次分别运用模糊聚类法和层次分析法得出各指标的聚类中心和权重; 然后对现状年2010年和对比年2003年进行河西走廊地区水资源脆弱性评价; 最后设置不同的发展模式, 计算水资源脆弱性阈值。结果表明: 现状年下河西走廊地区水资源脆弱性值为68.24, 为重度脆弱状态; 黑河、疏勒河、石羊河三个流域为重度脆弱状态, 且脆弱性依次加重; 研究区域水资源脆弱性阈值上限为89.07, 处于极脆弱状态, 水资源脆弱性阈值下限为30.76, 处于轻度脆弱状态。

**关键词:** PSR 指标体系; 模糊聚类; 河西走廊; 水资源脆弱性; 阈值

\*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB955304); 国家自然科学基金资助项目(41171032)。

作者简介: 李智飞(1988-), 男, 河南省许昌人, 硕士生, 主要研究方向为水资源脆弱性、生态需水。

## 1. 引言

水资源脆弱性的研究, 最早出现于 1968 年法国的 Marget 提出“地下水脆弱性”这一术语<sup>[1]</sup>。随后众多学者对水资源脆弱性进行了研究。国内水资源脆弱性的研究起步于上世纪 90 年代。目前, 水资源脆弱性的定量化和变化规律研究已成为水文水资源学家和灾害研究者关注的焦点<sup>[2]</sup>。其中, 水资源脆弱性的阈值问题是研究水资源脆弱性变化规律的关键性问题, 但目前仍未研究<sup>[3-5]</sup>。

从 20 世纪 50 年代以来, 河西走廊地区人口增加、社会经济发展和水土资源的大规模开发利用引起一系列水文和生态环境变化<sup>[6]</sup>, 该地区已经演变成成为我国西北内陆生态环境退化最为严重的地区<sup>[7]</sup>。河西走廊石羊河下游的民勤, 面临着成为“第二个罗布泊”的危机; 黑河中下游地区沙漠化问题十分突出; 祁连山水源涵养区生态遭受破解、水源涵养功能受损; 疏勒河和党河下游的敦煌, 面临着成为“第二个楼兰”的危险<sup>[8]</sup>。这些问题反映出河西走廊水资源系统是脆弱的。然而, 河西走廊地区的水资源脆弱到何种程度, 需要进行量化研究。

本文以河西走廊地区为研究区, 对其进行水资源脆弱性量化及阈值问题分析, 其结果对河西走廊地区水资源综合规划、防灾减灾和可持续发展提供一定的理论依据。

## 2. 水资源脆弱性评价模型的构建

从不同的水资源脆弱性影响因素考虑, 水资源脆弱性量化评价方法主要分为三类: 指标权重法, 综合指标法, 函数法<sup>[9]</sup>。指标权重法考虑较为全面, 运用较广, 但缺乏一定的物理机制、动态反映脆弱性较为困难; 综合指标法及函数法基于物理机制建立, 但选取指标较少、较难全面反映脆弱性。本研究认为水资源脆弱性不仅包含水资源系统自身的敏感性、恢复性, 还包含人类社会对水资源系统的适应性措施。水

资源脆弱性是水资源系统受到气候变化和人类活动等外界作用, 经过人类社会的适应性措施后, 系统的结构和功能可能受到损坏、损失或不利影响的倾向或趋势。基于此, 本研究利用 PSR 物理框架建立指标体系, 运用模糊数学, 建立水资源脆弱性评价模型。

### 2.1. PSR 指标体系

基于对水资源脆弱性影响因素的理解, 采取加拿大统计学家安东尼·弗雷德提出的 PSR 物理概念模型<sup>[10]</sup>。PSR 模型中压力因素 P 理解为外部环境施加给系统的作用力, 会导致系统发生一定的改变。状态因素 S 理解为系统受到作用力后, 由于脆弱性表现出来的损害、损失或不利影响的状态。响应因素 R 理解为人类社会对系统做出一定的适应性措施。

利用 PSR 物理概念模型, 根据指标选取的科学性、整体性、可操作性、协调性、独立性、层次性等原则, 建立四层水资源脆弱性评价指标体系: 1) 目标层: 以水资源脆弱性评价为总目标层; 2) 准则层: 为水资源压力、状态、响应三部分; 3) 子准则层: 包含生活用水、生产用水、生态用水、水量、水质、工程技术和政策管理 7 部分; 4) 指标层: 由可直接度量子准则层的具体指标构成。由于不同指标对水资源脆弱性起到促进或抑制作用, 因此将指标分为正向和反向两类<sup>[11]</sup>。正向指标越大, 脆弱性值越大; 反向指标越大, 脆弱性值越小。具体指标及含义见表 1。

### 2.2. 模糊综合评判模型

对于研究区的水资源脆弱性状况, 按照指标体系的各个指标对水资源脆弱性的影响程度进行划分。这一划分通过模糊集合  $U$  来表示, 模糊集合的评语从轻到重, 包括不脆弱、轻度脆弱、中等脆弱、重度脆弱和极脆弱五类, 而综合评判集  $U$  通过构建指标体系的指标权重集 ( $W$ ) 与各指标对评语的隶属度集 ( $R$ ) 的模糊积来表示, 见式(1)。

$$U = [\text{不脆弱, 轻度脆弱, 中等脆弱, 重度脆弱, 极脆弱}]$$

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = W \cdot R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table 1. PSR model index system of water resources vulnerability  
表 1. 水资源脆弱性的 PSR 模型指标体系

目标层	准则层	子准则层	指标层	指标性质	具体含义
水资源压力(P)	生活用水	城镇居民生活用水定额	正向	城镇居民生活用水量/城镇人口, 反映城镇居民用水压力	
		农村居民生活用水定额	正向	农村居民生活用水量/农村人口, 反映农村居民用水压力	
	生产用水	万元 GDP 用水量	正向	总用水量/GDP, 反映国民生产用水压力	
		亩均用水量	正向	灌溉用水/灌溉面积, 反映农业用水压力	
	生态用水	生态用水比重	反向	生态用水量/总用水量, 反映生态用水的情况	
水资源脆弱性		人均水资源量	反向	水资源总量/总人口, 反映人均水资源禀赋	
水资源状态(S)	水量	产水模数	反向	自产水资源量/流域面积, 反映地均水资源禀赋	
		水资源开发利用率	正向	总用水量/水资源总量, 反映人类对水资源的开发利用	
水资源响应(R)	水质	水质达标率	反向	水质分类河长比例, 反映水质优劣情况	
	工程技术	节灌率	反向	节水灌溉面积/灌溉面积, 表征节水技术的推广应用程度	
	政策管理	人均 GDP	反向	GDP/总人口, 表征人类的经济水平、自身素质及管理能力	

然后, 将综合评判集  $U$  和相应的聚类标度  $h$  相乘得到级别特征值  $H^{[12]}$ , 见式(2)。

$$H = \sum_{k=1}^n h_k \cdot u_k \quad (2)$$

式中:  $W$  是各指标权重;  $r_{ij}$  是隶属度, 采用各个指标与各相邻类中心的距离进行线性插值得到;  $H$  为样本  $U$  对模糊概念的级别特征值;  $n$  为级别的数目;  $h_k$  为级别的标度。

级别特征值  $H$  能够集中反映各个隶属度的影响因素, 表达研究区的水资源脆弱性状况。

### 2.3. 聚类中心与权重

为较直观显示各类指标的优劣, 采用聚类分析法中的快速样本聚类对各指标的聚类中心进行分析和计算<sup>[13,14]</sup>。

以 2010 年为基础, 将全国中 31 个省市自治区及平均值的 32 个样本(西藏自治区人口稀少, 面积广阔, 聚类时会产生较大变异值, 故舍去), 用快速聚类法, 按 5 个类中心进行聚类分析, 得到不脆弱、轻度脆弱、中等脆弱、重度脆弱和极脆弱 5 个类别中心值(见表 2)。研究资料取自 2010 年中国水资源公报。其中, 人均水资源量按国际人口行动提出的《持续水 - 人口和可更新水的供给前景》中的水资源量标准进行归类<sup>[15]</sup>; 水资源开发利用率按国际认可的 40% 为流域水资源利用安全警示线, 为中等脆弱状态; 水质达标率, 用

分类河长水质比例代表, 按国家划分水质的等级来代表, 将劣 V 类作为极脆弱, V 类为重度脆弱, IV 类为中等脆弱, II 和 III 类合并为轻度脆弱, I 类为不脆弱, 由此得到水质参数指标的 5 个类中心。由于指标体系响应部分的作用为促使脆弱性降低的, 该部分指标节灌率和人均 GDP 从标度值 50 开始, 没有不脆弱和轻度脆弱这两种状态。

针对研究区特殊的地理环境, 各指标的权重值具有区域性特点, 利用层次分析法的九级标度得到各子指标的权重(a); 在此基础上, 计算出压力和状态下各指标的权重(b), 见表 2。两者主要差别为后者没有考虑适应性措施。

其中, 表 2 中各标度相对各级别只是相应的一个点值, 各级别之间应表现为连续性。根据聚类中心归类思想, 将标度按级别进行等间距划分, 进一步得出脆弱性级别区间的划分(见表 3)。

## 3. 数据来源与水平年设计

### 3.1. 研究区概况与数据来源

河西走廊位于甘肃省西北部, 地处黄河甘肃段以西, 由祁连山和北山所限形成狭长地带而得名。河西走廊东端以乌鞘岭为界, 西端以甘肃、新疆交界的星星峡为界, 南部以高耸的祁连山与青海省相邻, 北侧为低缓的北山与内蒙古自治区接壤, 东西长近 1000 km, 南北宽 50~120 km, 总面积 27 万 km<sup>2</sup>, 占甘肃

**Table 2. Clustering centers of indexes**  
**表 2. 各指标聚类中心**

标度(h)	0	25	50	75	100	权重(a)	权重(b)
级别	不脆弱	轻度脆弱	中等脆弱	重度脆弱	极脆弱		
城市居民生活用水定额(L/d)	122	191	230	289	350	0.018	0.020
农村居民生活用水定额(L/d)	42	70	112	148	207	0.018	0.020
万元 GDP 用水量(m <sup>3</sup> )	74	180	295	428	984	0.140	0.160
亩均灌溉用水量(m <sup>3</sup> )	168	378	559	741	981	0.140	0.160
生态用水比重(%)	11.36	5.06	3.47	2.07	0.67	0.070	0.080
人均水资源量(m <sup>3</sup> )	5000	3000	1700	1000	500	0.123	0.140
产水模数(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	136.3	112.6	69.3	42.4	10.5	0.158	0.180
水资源开发利用率	10%	20%	40%	60%	80%	0.158	0.180
水质达标率	I	II 和 III	IV	V	劣 V	0.053	0.060
节灌率(%)	95	50	0	-	-	0.053	
人均 GDP(万元)	15	6	0	-	-	0.070	

**Table 3. Level interval value of vulnerability**  
**表 3. 脆弱性级别区间值**

级别	不脆弱	轻度脆弱	中等脆弱	重度脆弱	极脆弱
区间	0~12.5	12.5~37.5	37.5~62.5	62.5~87.5	87.5~100

省国土面积的 60%。河西走廊自西向东依次分布有疏勒河、黑河与石羊河三个内陆河流域(见图 1)。

河西走廊在气候上以干旱、极干旱著称,其特征是降水稀少,蒸发强烈,气候干燥,光照充足,昼夜温差大,是典型的大陆性气候。河西走廊年平均气温 5℃~10℃,年降水量 50~160 mm,年蒸发能力 1500~2500 mm。

本文数据主要来源于 2003 和 2010 年甘肃省水资源公报,甘肃省第二次水资源评价结果等。

### 3.2. 水平年设计

以 2010 年为现状年;2003 年以来,河西走廊地区各个流域水资源开发利用发生了较为剧烈的变化,又由于 2003 年河西走廊地区降水量为 128.2 mm,与 2010 年降水量 133.1 mm 非常接近,且接近平水年降水量 137.2 mm;故将 2003 年作为对比年份。

为模拟河西走廊地区水资源脆弱性的阈值,本文设置生态环境改善不同情况下的两种情景水平年,分别为生态环境发展控制极好时,未来某个时期可能达

到的水平年(以 A1 情景代表)与生态环境发展控制极差时,过去或者未来某个时期可能出现的水平年(以 B1 情景代表)。A1 情景下,社会经济达到发达国家水平,各项指标达到先进程度,脆弱性值为最低,为阈值下限。B1 情景下,社会经济水平较低,各项指标为贫困国家水平,脆弱性值为最高,为阈值上限。

根据表 1 所构建的水资源脆弱性指标体系,搜集、统计和整理河西走廊地区水资源脆弱性 PSR 指标体系各个水平年的指标值,如表 4 所示。对比年和现状年份的研究区各个指标数据,来源于 2003 年和 2010 年甘肃省水资源公报。其中,水质达标率,依据表 2 的聚类中心,从甘肃省水资源公报中得到河长水质各个类别的相应比例,计算表 2 中相应级别的隶属度。A1 情景下,社会经济比较发达,城乡差距较小,城镇和农村用水差距较小,万元 GDP 用水量、亩均用水量、生态用水比重、水质达标率、节灌率和人均 GDP 等指标达到先进程度,均为不脆弱状态;根据河西走廊水资源实际情况,水资源开发利用率按 40%进行设置。B1 情景下,社会经济欠发达,生态环境较为恶劣,城镇居民生活用水、农村居民生活用水、万元 GDP 用水量、亩均灌溉用水量、生态用水比重、水质达标率等指标均处于历史值较不利的状态;此情景下,只考虑压力和状态下各因素指标,不考虑适应性措施,以使脆弱性上限值更大;脆弱性值计算时,权

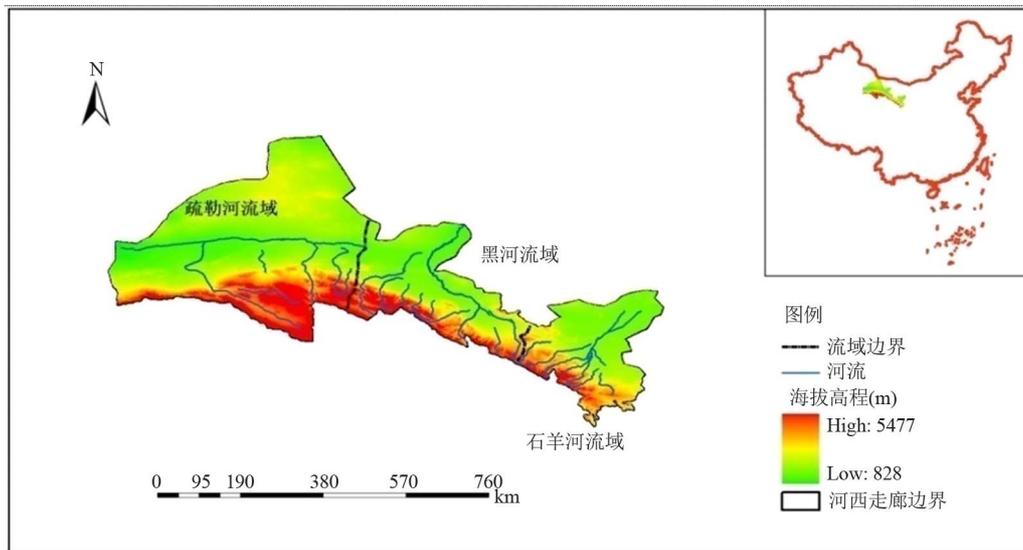


Figure 1. Hexi Corridor and its' basins  
图 1. 河西走廊地区及三个流域

Table 4. PSR model values of water resources vulnerability in Hexi Corridor and its basins in different level years  
表 4. 河西走廊地区各水平年下水资源脆弱性 PSR 模型指标

水平年	城市居民生活用水定额(L/d)	农村居民生活用水定额(L/d)	万元 GDP 用水量(m <sup>3</sup> )	亩均灌溉用水量(m <sup>3</sup> )	生态用水比重(%)	人均水资源量(m <sup>3</sup> )	产水模数(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	水资源开发率(%)	节灌率(%)	人均 GDP(万元)	
疏勒河	2003 年	128	41	1840	692	0.05	4952	1.4	53.76	42.96	1.45
	2010 年	126	70	903	957	4.06	6014	1.78	73.28	55.32	4.88
	A1 情景	122	112	74	168	11.36	6175	1.92	40	95	15
	B1 情景	122	42	984	981	0.67	6175	1.92	80	-	-
黑河	2003 年	114	41	2286	695	0.06	1013	3.29	97.77	66.73	0.79
	2010 年	121	79	533	586	1.08	1389	4.62	66.28	75.49	2.77
	A1 情景	122	112	74	168	11.36	987	3.45	40	95	15
	B1 情景	122	42	984	981	0.67	987	3.45	80	-	-
石羊河	2003 年	114	41	1890	725	0.07	1058	5.89	109.26	82.61	0.61
	2010 年	122	68	539	661	2.59	767	4.14	142.04	89.2	2.02
	A1 情景	122	112	74	168	11.36	752	4.26	40	95	15
	B1 情景	122	42	984	981	0.67	752	4.26	80	-	-
河西走廊	2003 年	116	41	2048	705	0.07	1438	2.49	88.54	68.18	0.77
	2010 年	122	72	608	689	2.44	1595	2.76	82.91	75.92	2.65
	A1 情景	122	112	74	168	11.36	1435	2.61	40	95	15
	B1 情景	122	42	984	981	0.67	1435	2.61	80	-	-

重采用表 2 中权重(b)。对 A1 情景和 B1 情景, 水资源总量采用年平均水资源总量, 包含多年入境水资源量; 产水模数用年平均自产水资源量计算; 河西走廊地区在 2003 年至 2010 年, 人口总数从 467.28 万略降

为 466.97 万, 变化幅度很小, 假定未来人口保持均衡不变, 计算相应的人均水资源量。需要指出, A1 情景和 B1 情景所选取的指标值为较科学地得出水资源脆弱性上下限值, 所以结合表 2 中的聚类中心值进行

选取。

## 4. 水资源脆弱性评价结果与阈值分析

### 4.1. 水资源脆弱性评价结果

对河西走廊地区现状年水资源脆弱性进行评价。计算过程如下: 首先根据表 2 的指标聚类中心值, 将表 4 现状年的各指标进行线性插值, 得到河西走廊地区的隶属度; 然后利用表 2 中水资源脆弱性指标权重(a)与相应的隶属度, 运用(1)式可分别得出河西走廊地区的综合评判集; 再运用(2)式将综合评判集与聚类标度相乘, 得到现状年河西走廊地区的水资源脆弱性级别特征值。

同理, 计算对比年份河西走廊地区水资源脆弱性级别特征值; 计算三个流域现状年和对比年的水资源脆弱性值。并依据此结果计算研究区的水资源脆弱性变化率, 见表 5。

结合表 3, 分析表 5, 可得出:

疏勒河流域: 1) 现状年 2010 年的水资源脆弱性为重度脆弱性状态; 2) 现状年相对对比年, 水资源脆弱性升高 5.01%。分析原因: 疏勒河流域 2003 年总用水量为 12.758 亿  $m^3$ , 到 2010 年总用水量达到 22.156 亿  $m^3$ , 增加 73.48%, 其中农田灌溉用水量增加最为显著, 从 2003 年的 10.946 亿  $m^3$  到 2010 年的 18.222 亿  $m^3$ , 造成亩均灌溉用水量、水资源开发利用效率等指标提高较大, 故疏勒河流域脆弱性程度加大。

黑河流域: 1) 现状年 2010 年和对比年 2003 年的水资源脆弱性均为重度脆弱状态; 2) 现状年相对对比

年, 水资源脆弱性降低 14.05%, 下降较为明显。分析原因: 黑河流域 2003 年总用水量 34.879 亿  $m^3$ , 到 2010 年总用量为 29.141 亿  $m^3$ , 下降 16.45%; 水资源总量(包含入境水量)2003 年为 35.675 亿  $m^3$ , 2010 年为 43.636 亿  $m^3$ , 增加 22.31%; 而 GDP 增加较为显著, 进而万元 GDP 用水量、水资源开发利用效率等指标下降较大, 故造成黑河流域脆弱性程度减小。

石羊河流域: 1) 现状年 2010 年和对比年 2003 年的水资源脆弱性均为重度脆弱状态; 2) 现状年相对对比年, 水资源脆弱性降低 6.05%, 呈小幅度下降趋势。分析原因: 石羊河流域近年来, 政府加强水资源管理, 降低耗水作物种植面积, 提高水资源利用效率, 总用水量 2003 年 26.185 亿  $m^3$ , 2010 年降为 23.908 亿  $m^3$ ; 但石羊河流域属于资源型缺水流域, 尤其下游民勤生态问题较为严峻, 整体水资源脆弱性程度仍为重度脆弱状态。

河西走廊地区: 1) 现状年 2010 年和对比年 2003 年的水资源脆弱性均为重度脆弱状态; 2) 现状年相对对比年, 水资源脆弱性降低 7.30%。总之, 河西走廊地区水资源脆弱性为重度脆弱状态, 但呈下降趋势。分析原因: 河西走廊地区 2003 年总用水量 73.822 亿  $m^3$ , 到 2010 年总用量为 75.206 亿  $m^3$ , 略升高 1.87%; 但河西走廊地区万元 GDP 用水量从 2003 年的 2048  $m^3$  降到 2010 年的 608  $m^3$ , 下降 70.31%; 加之近年来对河西走廊地区水利基础设施加大投入, 用水效率提高, 水资源脆弱程度呈现下降趋势, 但自身水资源禀赋不足, 水资源开发利用效率仍然较高, 脆弱程度比较严重。

Table 5. Values of water resources vulnerability in Hexi Corridor  
表 5. 河西走廊地区水资源脆弱性结果

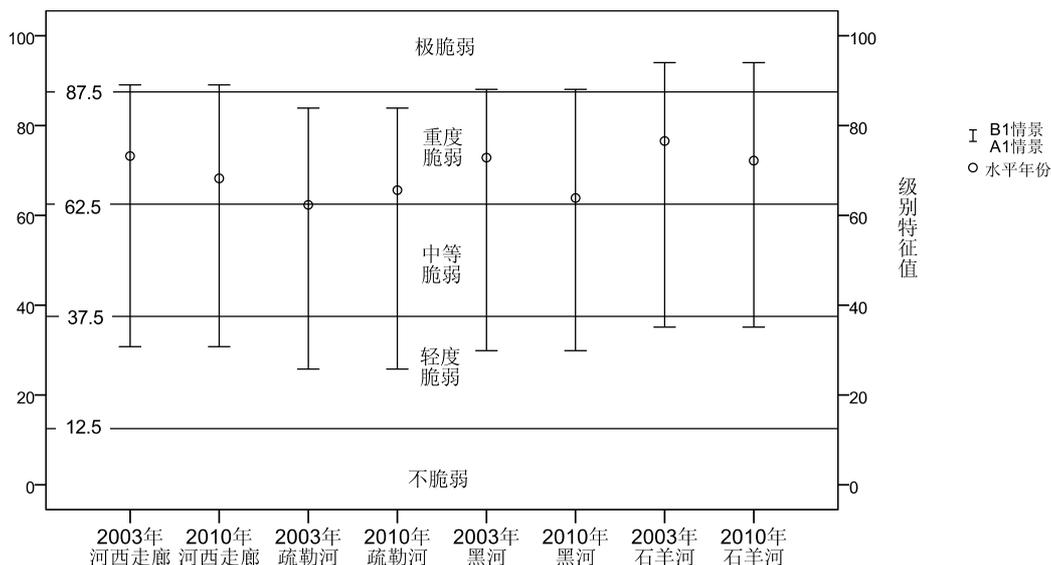
流域	水平年	水平年脆弱性值	脆弱性值变化率
疏勒河	2003 年	62.34	
	2010 年	65.63	5.01%
黑河	2003 年	72.86	
	2010 年	63.88	-14.05%
石羊河	2003 年	76.57	
	2010 年	72.2	-6.05%
河西走廊	2003 年	73.22	
	2010 年	68.24	-7.30%

### 4.2. 阈值分析

计算研究区水资源脆弱性阈值。同河西走廊现状年水资源脆弱性级别特征值计算过程相似, 计算 A1 情景和 B1 情景河西走廊及其三个流域水资源脆弱性级别特征值, 得到脆弱性阈值上下限, 见表 6。其中, 由于 B1 情景, 适应性指标为无, 计算过程中权重采用表 2 中权重(b)。根据表 3, 计算不同脆弱状态下的河西走廊水资源脆弱性阈值区间所占比例。以疏勒河计算为例, 疏勒河流域水资源脆弱性阈值区间值为 58.11; 阈值区间中无不脆弱和极脆弱状态, 其相应比例均为 0%; 轻度、中等、和重度脆弱的区间分别为

**Table 6. Threshold values of water resources vulnerability in Hexi Corridor**  
**表 6. 河西走廊地区水资源脆弱性阈值结果**

流域	情景 A1 脆弱性值	情景 B1 脆弱性值	区间值	不脆弱比例	轻度脆弱比例	中等脆弱比例	重度脆弱比例	极脆弱比例
疏勒河	25.77	83.88	58.11	0%	20.19%	43.02%	36.79%	0%
黑河	29.88	88.07	58.19	0%	13.10%	42.96%	43.94%	0.98%
石羊河	35.11	94.03	58.92	0%	4.06%	42.43%	53.51%	11.08%
河西走廊	30.76	89.07	58.31	0%	11.56%	42.87%	45.57%	2.69%



**Figure 2. Threshold values and level characteristic values of water resources vulnerability in Hexi Corridor and its basins**  
**图 2. 河西走廊及其三个流域的水资源脆弱阈值和级别特征值**

11.73、25、21.38, 其相应比例分别为 20.19%、43.02%、36.79%。同理计算其他流域。用水资源脆弱性可伸缩度(水资源脆弱性阈值区间/总区间值)表示流域水资源脆弱性可变化范围的程度; 其值越大, 表明脆弱性变化范围大, 反之变化范围小。

利用 SPSS 软件将表 5 和表 6 结果用高低图呈现出来, 如图 2 所示。从图 2 中, 可更为直观地表现出来河西走廊地区水资源脆弱性阈值及其脆弱性值变化。

分析表 6 和图 2, 得出: 1) 在较为理想的 A1 模式下, 河西走廊水资源脆弱性阈值下限是 30.76, 处于轻度脆弱状态; 若发展控制不合理, 按照 B1 模式, 水资源脆弱性阈值上限是 89.07, 达到极脆弱状态。2) 河西走廊水资源脆弱性阈值区间没有不脆弱状态, 主要为轻度脆弱、中等脆弱、重度脆弱三个状态; 中等脆弱和重度脆弱状态的比例为 80%左右。3) 河西走廊及其三个流域的脆弱性阈值区间为 58 左右, 则河

西走廊地区的水资源脆弱性可伸缩度为 0.58。4) 图 2 较为直观地表现出脆弱性的变化状况, 现状年下, 河西走廊整体为重度脆弱状态, 脆弱程度下降的空间较大; 黑河、疏勒河、石羊河的水资源脆弱程度依次增加; 疏勒河流域需要合理的水资源利用, 扭转脆弱程度上升的趋势。

### 5. 结论与讨论

本文主要针对河西走廊地区水资源脆弱性及其阈值问题进行研究。通过设计两种不同发展水平的情景年, 计算研究区水资源脆弱性阈值。结果表明:

1) 现状年下, 河西走廊水资源脆弱性为重度脆弱状态, 且黑河、疏勒河、石羊河三个流域的脆弱性逐次加重; 除疏勒河流域水资源脆弱性增加外, 石羊河、黑河流域脆弱性均呈下降趋势。

2) 在不同发展模式下, 研究区水资源脆弱性将会有完全不同的变化趋势。在较为理想的 A1 模式下,

河西走廊水资源脆弱性阈值下限是 30.76, 处于轻度脆弱状态; 如果发展控制不合理, 按照 B1 模式, 未来水资源脆弱性阈值上限是 89.07, 达到极脆弱状态。

3) 石羊河流域脆弱程度最为严重, 需要提高水资源利用效率, 减小下游地下水开采量, 可考虑外流域调水和加强流域水资源统一管理。黑河流域水资源较为充沛, 需要流域水资源统一调配, 上中下游合理利用, 提高农业用水效率。疏勒河流域水资源脆弱程度增加, 需要遏制农业用水增加的势头, 降低耗水作物种植面积, 提高用水效率, 加强流域水资源统一管理。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 1-7.  
SUN Caizhi, Pan Jun. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4): 1-7. (in Chinese)
- [2] 郝振纯, 于翠松, 王加虎, 等. 变化环境下水资源系统脆弱性和恢复力研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
HAO Zhenchun, YU Cuisong, WANG Jiahu, et al. Research of water resource vulnerability and resilience in changing environment. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 陈攀, 李兰, 周文财. 水资源脆弱性及评价方法国内研究进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 32-38.  
CHEN Pan, LI lan and ZHOU Wencai. Research progress on vulnerability of water resources and assessment methods at home and abroad. *Water Resource Protection*, 2011, 27(5): 32-38. (in Chinese)
- [4] 马芳冰, 王烜, 李春晖. 水资源脆弱性评价研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 30-37.  
MA Fangbing, WANG Xuan and LI Chunhui. Research progress in water resources vulnerability assessment. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(1): 30-37. (in Chinese)
- [5] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451.  
XIA Jun, QIU Bing, PAN Xingyao, et al. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 443-451. (in Chinese)
- [6] 程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略: 以黑河流域为例[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 405-413.  
CHENG Guodong, XIAO Hongliang, XU Zhongmin, et al. Water issue and its countermeasure in the inland river basins of Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(6): 405-413. (in Chinese)
- [7] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆区干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报, 2004, 8: 8-14.  
WANG Hao, QIN Dayong, WANG Yan, et al. Ecological status and its evolution trend in arid region of northwest China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 8: 8-14. (in Chinese)
- [8] 李志刚. 河西走廊人居环境保护与发展模式研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
LI Zhigang. Research on model of conservation and development of human settlements in Hexi Corridor. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 夏军, 陈俊旭, 翁建武, 等. 气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 91-96.  
XIA Jun, CHEN Junxu, WENG Jianwu, et al. Advances and future prospects of research in water resources vulnerability under climate change. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 8(6): 91-96. (in Chinese)
- [10] 高珊, 黄资金. 基于 PSR 框架的 1952~2008 年中国生态建设成效评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 341-350.  
GAO Shan, HUANG Xinjin. Performance evaluation of eco-construction based on PSR model in China from 1953 to 2008. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 341-350. (in Chinese)
- [11] 廖强, 张士锋, 陈俊旭. 基于 PSR 模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源研究, 2013, 2: 188-195.  
Liao Qiang, Zhang Shifeng and Chen Junxu. An assessment of water resources shortage risk in Beijing based on PSR. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2: 188-195. (in Chinese)
- [12] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
CHEN Shouyi. Theory and application in engineering fuzzy set. Beijing: National defense of Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 张士锋, 孟秀敬. 粮食增产背景下松花江区水资源承载力分析[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 342-347.  
ZHANG Shifeng, MENG Xiujing. Water resources carrying capacity of the Songhua River under the background of grain production increases. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(3): 342-347. (in Chinese)
- [14] 金菊良, 程吉林, 魏一鸣. 流域生态环境质量评价的熵模糊模式识别模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(1): 5-9.  
JIN Juliang, CHENG Jilin and WEI Yiming. Information entropy based fuzzy pattern recognition model for basin eco-environmental quality evaluation. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(1): 5-9. (in Chinese)
- [15] 许传良, 张钰, 王小玲. 甘肃省蒸发量及干旱指数研究[J]. 甘肃农业, 2004, 10: 67-68.  
XU Chuanliang, ZHANG Yu and WANG Xiaoling. Research of evaporation and drought index in Gansu Province. *Gansu Agriculture*, 2004, 10: 67-68. (in Chinese)