

# 基于模糊综合评价法的城市河流脆弱性研究

白庆芹, 汪妮, 解建仓, 方正

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对城市河流特点, 建立了城市河流脆弱性评价体系, 为城市河流的利用和保护提供参考。以泸灞河流域为研究对象, 选取适当的评价指标, 采用熵权赋值法确定权重, 并应用模糊综合评价法计算分析了泸灞河的脆弱程度。结果表明, 马渡王、常家湾以下地区脆弱程度最大, 其他地区脆弱度较好。建立的城市河流脆弱性评价体系能够系统地反映城市河流的脆弱性, 在水资源脆弱性的研究方面有所发展。模糊综合评价法方法简洁, 能够比较客观地反映河流现有的以及潜在的脆弱性, 可应用于城市河流脆弱性评价中。

**关键词:** 脆弱性; 熵权; 城市河流; 模糊综合评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0244-04

中图分类号: TV213.4

## A Study on Vulnerability of Urban Rivers Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

BAI Qing-qin, WANG Ni, XIE Jian-cang, FANG Zheng

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of the MOE,  
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** According to the characteristics of urban rivers, a vulnerability assessment system for urban rivers are established so as to provide a reference for the use and protection of urban rivers. By taking Chanba River as the research object, the vulnerability of the river is analyzed by choosing several appropriate evaluation indexes, using entropy method to determine the weights, and applying fuzzy comprehensive evaluation. Results show that the area below Maduwang and Changjiawan has the highest vulnerability, whereas other places have low vulnerability. The established system can systematically reflect the vulnerability of urban rivers and make some development in the research on the vulnerability of water resources. The method of fuzzy comprehensive evaluation is simple and can objectively reflect the current and potential vulnerabilities of rivers. Therefore, the method can be used for vulnerability assessment of urban rivers.

**Keywords:** vulnerability; entropy weight; urban river; fuzzy comprehensive evaluation

河流作为一个城市的重要因素, 不仅为城镇提供了生活水源以及工农业用水, 还具有生态、景观、文化等多方面的重要功能, 但是近年来随着我国经济的快速发展, 城市化的快速崛起, 在提高人民生活水平的同时, 人类对赖以生存的生态环境和自然资源造成了巨大破坏, 其中对城市河流的干扰尤为显著, 城市河流承受着人类带来的巨大压力<sup>[1]</sup>。因此, 对城市河流的脆弱性研究成为一个重要课题。

国内外学者对脆弱性的研究大多集中在环境、生态和灾害学等领域<sup>[2-6]</sup>, 在水资源脆弱性的研究方面, 对地下水脆弱性进行了大量的研究<sup>[7-11]</sup>, 相比之下对

地表水脆弱性的研究鲜少<sup>[12]</sup>, 而在城市河流脆弱性方面的研究就更加少。刘绿柳<sup>[13]</sup>提出脆弱性是水资源系统易于遭受人类活动、自然灾害威胁和损害的性质和其状态受损后难于恢复到原来状态和功能的性质。本文认为城市河流脆弱性是指城市河流系统在服务于社会经济和生态环境过程中对人类活动、自然灾害影响和破坏的敏感性以及缺乏应对能力从而使城市河流的结构和功能容易发生改变并难于恢复的一种属性。

目前, 在地表水资源脆弱性评价上尚无一个统一的评价标准和方法, 本文基于对城市河流的自身特性

收稿日期: 2011-03-16

修回日期: 2011-10-19

资助项目: 陕西省教育厅 2010 年省级重点实验室项目“城市河流脆弱性诊断及水源保护分区研究”(2010JS077); 国家自然科学基金项目“基于生态安全的城市化区域水土资源配置研究”(51079120); 公益性行业科研专项“Supported by the National Department Public Benefit Research Foundation”(201001011)

作者简介: 白庆芹(1985—), 女(汉族), 云南省镇雄县人, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划。E-mail: baiqingqin@126.com。

通信作者: 汪妮(1974—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 副教授, 博士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: wangni@xaut.edu.cn。

以及社会环境建立了城市河流脆弱性评价体系,旨在对城市河流的开发和管理提供参考和建议。

## 1 研究方法

### 1.1 城市河流脆弱性评价体系的建立

基于前人对水资源脆弱性的研究以及对水资源脆弱性内涵的理解,考虑到城市河流的水资源特征,本文建立了城市河流脆弱性指标体系,主要分为河流自身脆弱性和城市脆弱性两大系统(如图 1 所示)。在指标的选取中遵循科学全面地、可操作性和可比性等原则,定量和定性地选择指标。

河流脆弱性是反映河流水资源量、水土保持能力和水生态环境的性质,其指标主要包括年降水量、产水模数、降水量的变化率、水利工程调蓄能力、水资源开发利用率和河岸带植被覆盖率。城市脆弱性是反映城市人口、居民生活生产状态、对水资源的需求及对水环境的影响的性质,其指标包括人口密度、人均 GDP、水资源供需比、居民生活用水定额、城镇年节水率、污水排放量和综合水质。其中,年降水量、产水模数和降水量的变化率能够反映水资源量的变化。水利工程调蓄能力和水资源开发利用率反映了人类对水资源的利用程度;河岸带植被覆盖率反映了人类对河流的保护程度<sup>[14]</sup>。人均 GDP 和人口密度反映了城市的人口特点。水资源供需比和居民生活用水定额反映了人类生活生产对水资源的需求。城镇年节水率是城镇居民生活、工业和农业灌溉节水量与总用水量之比,反映了城镇居民的总节水能力。污水排放量和综合水质反映了人类生产生活用水对河流造成的健康危害程度。

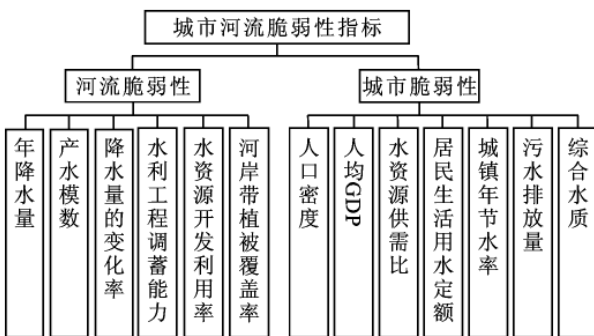


图 1 城市河流脆弱性指标体系

### 1.2 基于熵权的城市河流脆弱性模糊综合评价<sup>[15]</sup>

1.2.1 建立评价因素论域  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 即  $m$  个评价指标。

1.2.2 建立评语等级论域  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 即  $n$  个评价对象。

1.2.3 在  $U$  与  $V$  之间进行单因素评价,建立模糊关系矩阵  $R$ , 逐个对被评事物从每个因素  $u_j (j = 1, 2, \dots, m)$  进行归一化处理,进而得到模糊关系矩阵:

$$R = (r_{jk})_{mn} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $r_{jk}$  —— 因素论域  $U$  中第  $j$  个因素  $u_j$  对应于评语论域  $V$  中第  $k$  个等级  $v_k$  的隶属度, 其中  $0 \leq r_{jk} \leq 1, (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$ 。

隶属度  $r_{jk}$  的表达式为:

$$\text{越大越优型: } r_{jk} = (X_{jk} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$\text{越小越优型: } r_{jk} = (X_{\max} - X_{jk}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

式中:  $X_{\min}$  —— 第  $j$  个指标的最小值;  $X_{\max}$  —— 第  $j$  个指标的最大值。

1.2.4 确定评价因素的权重 权重表示各个指标的重要程度。本文采用具有客观性的熵权法进行赋值。

对于  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象的问题, 其第  $j$  个指标的熵定义为:

$$H_j = -K \sum_{k=1}^n f_{jk} \ln f_{jk} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中:  $f_{jk} = \frac{r_{jk}}{\sum_{k=1}^n r_{jk}}, K = \frac{1}{\ln n}$ , 当  $f_{jk} = 0$  时, 令  $f_{jk} \ln f_{jk} = 0$ 。

第  $j$  个指标的熵权定义为:

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (5)$$

式中:  $0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^m \omega_j \leq 1$ 。

当评价对象在某项指标上的值相差较大时,熵值较小,说明该指标提供的有效信息量较大,该指标的权重也应较大;反之,若某项指标的值相差较小,熵值较大,则说明该指标提供的信息量较小,该指标的权重也应较小。

1.2.5 计算模糊评价结果 将权向量  $\omega$  与模糊关系矩阵  $R$  合成运算得到模糊评价结果<sup>[16]</sup>, 即:

$$B = \omega \cdot R \quad (6)$$

式中:  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 。

## 2 实例分析与讨论

### 2.1 研究区概况

灞河流域位于西安市东南部,南依秦岭山地,北连渭河平原。该流域东与渭南市的临渭区、商洛市的洛南县、商州区毗邻,西与长安、雁塔、未央接壤,北与高陵、临潼相望,南与商洛市柞水县相连。

灞河流域绝大部分属西安市蓝田县、长安区和灞桥区管辖,仅有流域源头 78.5 km<sup>2</sup> 归商州市管辖。

根据全国水资源综合规划统一分区原则,可以将灞河流域共划分为 4 个水资源综合利用 5 级分区。这 4 个分区分别为灞河峪口以上区,浐河、常家湾以上区,灞河峪口至马渡王区和灞河马渡王、常家湾以下区。

2.2 评价指标

根据水资源系统脆弱性定义和指标选取原则,结

合 2010 年灞河流域的实际情况选取了具有代表性的年降水量( $X_1$ )、水利工程调蓄能力( $X_2$ )、水资源开发利用利用率( $X_3$ )、水资源供需比( $X_4$ )、人均 GDP( $X_5$ )、人口密度( $X_6$ )、居民生活用水定额( $X_7$ )、城镇年节水率( $X_8$ )、污水排放量( $X_9$ )9 项指标,进行城市河流脆弱性评价。

得到的各项指标数据见表 1,其中  $X_1, X_2$  和  $X_3$  表示灞河的河流脆弱性,其他几个则表示灞河城市脆弱性。

表 1 灞河流域城市河流脆弱性评价指标原始数据

灞河流域	灞河峪口以上	浐河、常家湾以上	灞河峪口至马渡王	马渡王、常家湾以下
年降水量均值 $X_1/\text{mm}$	834.40	757.30	711.00	604.90
水利工程调蓄能力 $X_2/(10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	0.16	2.44	1.56	2.07
水资源开发利用利用率 $X_3/\%$	5.30	20.10	15.50	59.10
水资源供需比 $X_4/\%$	69.16	62.55	59.60	86.81
人均 GDP $X_5$ (万元/人)	0.38	1.63	0.79	4.70
人口密度 $X_6/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	140.50	475.4	852.00	1601.00
居民生活用水定额 $X_7/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	203.00	225.00	205.00	260.00
城镇年节水率 $X_8/\%$	28.60	32.20	28.60	13.50
污水排放量 $X_9/10^4 \text{m}^3$	327.50	915.70	1 498.00	8 765.00

注:各指标数据来源于 2010 年西安市灞河流域综合规划报告。

2.3 归一化处理

以年降水量均值指标  $X_1$  为例,  $X_1$  为越大越优型,按照式(2)将  $X_1$  进行归一化处理,则:

$$r_{11} = \frac{x_{11} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{834.4 - 604.9}{834.4 - 604.9} = 1.000$$

$$r_{12} = \frac{x_{12} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{757.3 - 604.9}{834.4 - 604.9} = 0.664$$

$$r_{13} = \frac{x_{13} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{711 - 604.9}{834.4 - 604.9} = 0.462$$

$$r_{14} = \frac{x_{14} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{604.9 - 604.9}{834.4 - 604.9} = 0$$

得到  $r_{1k} = (1.000, 0.664, 0.462, 0)$ 。根据式(2)

和(3),相应地可将其他数据进行归一化处理,则各个指标组合的模糊关系矩阵  $R$  为:

$$R = r_{ij} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 0 & 0.352 & 0 & 1.000 & 0 & 0.808 & 1.000 \\ 0.664 & 1.000 & 0.275 & 0.108 & 0.289 & 0.771 & 0.386 & 1.000 & 0.930 \\ 0.462 & 0.614 & 0.190 & 0 & 0.095 & 0.513 & 0.035 & 0.808 & 0.861 \\ 0 & 0.908 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$$

2.4 权重的计算

根据式(4)和(5)可求得熵  $H_i$  和熵权  $\omega_i$  如表 2 所示。可发现水资源开发利用利用率、水资源供需比、人

均 GDP 和居民生活用水定额这 4 个指标的权重要大于其他指标权重,说明它们在该城市河流脆弱性指标体系中占有重要作用。

表 2 灞河流域脆弱性评价指标权重计算

评价指标	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$H_i$	0.757 4	0.778 0	0.605 6	0.573 3	0.538 0	0.767 3	0.499 7	0.788 7	0.791 1
$\omega_i$	0.083 6	0.076 5	0.135 9	0.147 1	0.159 3	0.080 2	0.172 5	0.072 9	0.072 0

注:  $H_i$  为评价指标的熵;  $\omega_i$  为评价指标的熵权。

2.5 模糊评价结果计算

根据模糊评价计算式(6)可知模糊评价结果为:

$$B = \omega \cdot R = (0.083\ 6\ 0.076\ 5\ 0.135\ 9\ 0.147\ 1\ 0.159\ 3\ 0.080\ 2\ 0.172\ 5\ 0.072\ 9\ 0.072\ 0) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 0 & 0.352 & 0 & 1.000 & 0 & 0.808 & 1.000 \\ 0.664 & 1.000 & 0.275 & 0.108 & 0.289 & 0.771 & 0.386 & 1.000 & 0.930 \\ 0.462 & 0.614 & 0.190 & 0 & 0.095 & 0.513 & 0.035 & 0.808 & 0.861 \\ 0 & 0.908 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.346\ 5\ 0.499\ 6\ 0.294\ 6\ 0.684\ 2)$$

评价指标标准的确定在脆弱性研究中起着非常重要的作用,标准设立的是否科学合理,直接关系到评价结果的正确与否。目前,城市河流脆弱性的评价标准尚处于探索阶段,有关评价的标准分级还没有统一的方法。本文在参考了国内外研究的标准后,根据上述模糊计算结果提出城市河流脆弱性评价标准,把

脆弱性程度分为 5 级,评价集为  $V = \{I, II, III, IV, V\}$ ,评价标准见表 3。其中年降水量均值、水利工程调蓄能力、水资源供需比、人均 GDP、居民生活用水定额和城镇年节水率均为越大越优型,数值越大,越不脆弱。而水资源开发利用率、人口密度和污水排放量为越小越优型,数值越小,越不脆弱。

表 3 城市河流脆弱性评价标准

评价指标	I	II	III	IV	V
评分标准	<0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	0.6~0.7	>0.7
脆弱程度	不脆弱	较不脆弱	中等不脆弱	较脆弱	脆弱

根据上述分析计算求得的 4 个地区的模糊综合评价计算结果,分别对各地区进行脆弱性分级。依据表 3 的河流脆弱性评价标准,将灞河峪口至马渡王地区河流脆弱性等级判断为 I 级,属于不脆弱地区;灞

河峪口以上地区的河流脆弱性等级判断为 II 级,属于较不脆弱等级;浐河、常家湾以上为 III 级,属于中等不脆弱等级;马渡王、常家湾以下地区为 IV 级,属于较脆弱(表 4)。

表 4 浐灞河流域模糊评价结果

浐灞河流域	灞河峪口以上	浐河常家湾以上	灞河峪口至马渡王	马渡王、常家湾以下
熵权 $\omega_i$	0.346 5	0.499 6	0.294 6	0.684 2
评价等级	II	III	I	IV

2.6 结果分析

西安市浐灞河流域整体脆弱性程度一般,马渡王、常家湾以下地区为最脆弱地区,该地区地处西安市东郊,是浐灞河流域的重点用水区,地下水长期超采,工业用水量大,这从一定程度上说明该地区经济发展与水资源的不协调。应严格控制马渡王、常家湾以下区的水资源开发利用,采取强有力的措施加大节水力度,做好城镇生活、农业、工业等各方面的节水工作,以改善现有的水资源短缺现状。其他 3 个区虽然脆弱度比较低,但是随着社会经济的发展以及人类需求的增长,仍然会存在着潜在的脆弱性。

的定性和定量指标。在模型的计算中采用熵权法,方法简洁,过程清晰,结果比较客观,改善了城市河流脆弱性评价的方法,为城市长期的健康发展、水资源的科学合理开发和河道的整治提供了依据。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 宋庆辉,杨志峰.对我国城市河流综合管理的思考[J].水科学进展,2002,13(3):377-382.

[2] Kirstin D. Exploring differences in our common future (s): The meaning of vulnerability to global environmental change[J]. Geoforum, 1992, 23(3):417-436.

[3] Diop S. Vulnerability assessments of mangroves to environmental change[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 58(1):1-2.

[4] Goh B S, Stability, vulnerability and persistence of complex ecosystems[J]. Ecological Modeling, 1975, 1(2): 105-116.

3 结 论

本文建立的城市河流脆弱性评价体系在水资源脆弱性的研究方面有所发展。在指标的选取过程中统筹考虑多重因素,根据各研究区域的自然地理特征、气候环境及社会经济等因素,选取符合该研究区

(下转第 256 页)

表 3 1981—2010 年各站持续发生干旱频率统计结果

干旱持续月数	1	2	3	4	5	6	7
榆林	12	4	1	—	—	—	—
延安	21	5	3	1	1	1	—
铜川	17	5	3	1	—	—	—
宝鸡	15	5	2	—	—	—	—
西安	24	4	1	—	—	—	—
渭南	23	5	3	1	1	—	—
咸阳	17	2	1	—	—	—	—
汉中	16	1	1	—	—	—	—
安康	16	5	1	—	—	—	—
商洛	16	2	—	—	—	—	—

### 3 结论

(1) 陕西省干旱分布极不均匀,总的分布特征是北多南少,干旱多发区主要集中在 2 个区域:陕北长城沿线风沙区和渭北塬区;干旱较少发生区主要集中在 3 个区域:子午岭与黄龙山之间的黄土高原区、秦岭山区和巴山山区。

(2) 陕西省干旱出现既有全省性的大范围干旱,也有区域性的局部干旱。陕北、关中发生区域性干旱频率明显高于陕南,陕北和关中同时发生干旱频率多于关中和陕南同时发生干旱频率。全省不会发生大范围干旱的月份为 3—10 月,不会发生区域性干旱的月份为 6—8 月,而每年 11 月至翌年的 2 月是陕西省发生大范围和区域性干旱较多的月份。

(3) 陕西省干旱发生季节在陕北、关中、陕南有显著差别,陕北、关中和陕南 3 个区域多旱月和少旱月频率有较强的一致性。陕南干旱的季节性差异较

小,关中次之,陕北干旱季节性差异最大。

(4) 持续性干旱有的出现在同一季节,有的要跨两个季节。陕北和关中持续性干旱发生频率远大于陕南,从干旱持续时间来看,陕南发生 3 个月以上干旱的可能性很小。

本文在分析陕西省干旱发生特征时采用了降水量距平百分率干旱指标,仅从降水量因素分析研究了大气干旱的特征,没有考虑地表的水文、植被以及人类活动等其他因素的共同影响。如何从大气环流和地球表层系统的角度出发,综合考虑各种因子,尽可能做到客观、全面地分析陕西省干旱发生的时空特征,需要深入进行研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 闫峰,王艳姣,吴波.近 50 年河北省干旱时空分布特征[J].地理研究,2010,29(3):423-430.
- [2] 秦鸿儒,付明胜.连续干旱对土壤水分与植物存活影响调查研究[J].水土保持通报,2005,25(1),41-43.
- [3] 方锋,梁东升,张存杰.西北干旱监测预警评估业务系统开发与应用[J].水土保持通报,2010,30(3):140-143.
- [4] 景毅刚,张树誉,乔丽,等.陕西省干旱预测预警技术及其应用[J].中国农业气象,2010,31(1):112-120.
- [5] 乔丽,杜继稳,姜志红,等.陕西省生态农业干旱区划研究[J].干旱区地理,2009,27(1):112-118.
- [6] 李星敏,杨文峰,高蓓,等.气象与农业业务化干旱指标的研究与应用现状[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(7):111-116.
- [7] 乔丽,杜继稳,薛春芳,等.干旱指标在陕西省适用性研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):1-6.
- [8] 吕从中.陕西省农业气候区划[M].西安:西安地图出版社,1988.
- [9] Gogur C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods [J]. Environmental Geology, 2000, 39(6):5439-559.
- [10] 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.
- [11] 姜桂华,王文科,乔小英.关中盆地地下水特殊脆弱性及其评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(6):1106-1110.
- [12] 邹君,刘兰芳,田亚平.地表水资源的脆弱性及其评价初探[J].资源科学,2007,29(1):93-94.
- [13] 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.
- [14] 邱宛华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2002:193-196.
- [15] 胡永宏,贺思辉.综合评价方法[M].北京:科学出版社,2000:167-172.
- [16] 郭坤荣.大汶河生态健康评价研究[D].济南:山东师范大学,2007.

(上接第 247 页)

- [5] 牛文元.生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J].生态学报,1989,9(2):97-105.
- [6] 朱震达.中国的脆弱生态带与土地荒漠化[J].中国沙漠,1991,11(4):11-22.
- [7] Doerfliger N, Jeannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools [J]. Environmental Geology, 1999,39(2):165-176.
- [8] Vrba J, Zaporozec A. Guide book on mapping groundwater vulnerability[M]. International Contributions to Hydrogeology. Hannover: GFR, 1994.
- [9] Gogur C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods [J]. Environmental