

河西绿洲城市干旱脆弱性评价^①

雍国正, 刘普幸*, 姚玉龙, 陈丽丽, 高原, 王允

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 用熵值法和贡献度模型, 对河西绿洲城市的干旱脆弱性及主要贡献因子进行分析。结果表明: 张掖市、酒泉市和金昌市城市干旱脆弱性均处于中等水平, 嘉峪关市干旱脆弱性水平较低, 武威市干旱脆弱性水平很高; 河西绿洲城市干旱脆弱性的空间分异与城市化水平基本一致, 敏感性与城市化水平关系密切, 应对能力受经济水平和自然因素的影响, 但自然条件发挥防御干旱的应对作用更大; 各市干旱脆弱性指标层的主要贡献因子不尽相同, 但总体呈趋同态势, 主要集中表现在社会干旱敏感性及应对干旱的技术、自然条件等因子上。最后, 有针对性地提出了具体的对策与措施。

关键词: 河西绿洲; 干旱; 脆弱性; 评价; 对策
中图分类号: F291.1

干旱已成为一个严重威胁人类生存的环境问题。随着人口增加和经济发展, 旱灾所造成的损失也越来越严重。1951—1990年中国平均每年发生旱灾 7.5 次, 受旱农田面积 2 000 万 hm^2 , 成灾面积 670 万 hm^2 , 近 30 年因旱灾损失粮食占中国粮食损失总量的 50%^[1]。据 1950—2008 年的资料统计, 全国年均受旱面积 $2.157 \times 10^7 \text{hm}^2$, 成灾面积 $9.56 \times 10^6 \text{hm}^2$, 因旱损失粮食 $1.58 \times 10^{10} \text{kg}$ 。其中, 1991—2008 年全国年均因旱粮食绝收面积 $2.90 \times 10^6 \text{hm}^2$, 饮水困难人口 2.801×10^7 人, 饮水困难牲畜 2.197×10^7 头^[2]。自 20 世纪 70 年代以来, 我国旱灾问题日趋突出。据统计, 我国现有 667 个城市, 其中有 400 个缺水, 比例高达 70%, 严重缺水的城市有 110 个, 城市年缺水总量达 60 亿 m^3 ^[3]。因此, 对城市干旱问题进行研究具有很重要的现实意义。对于干旱灾害所造成的影响以及应对机制, 前人做了卓有成效的研究, 但就其具体内容来看, 多集中在农、林、牧等领域, 对于城市的综合影响则研究较少, 然而城市干旱脆弱性问题越来越突出, 干旱严重威胁着城市的发展, 所以如何应对城市干旱是我国城市发展需要解决的问题。

20 世纪 90 年代以来, 关于脆弱性的研究大量涌现, 并呈上升趋势; 学术界对脆弱性研究的关注程度越来越高, 2001 年 4 月《科学》杂志发表的“可持续性科学 (sustainability science)”一文把“特殊地

区的自然-社会系统的脆弱性或恢复力”研究列为可持续性科学的 7 个核心问题之一^[4]。城市干旱是指由于水源地遇枯水期或受突发水污染事件以及城市水资源需求不断增加的影响, 城市供水难以满足生产生活正常需求, 使城市社会、经济和生态系统受到影响的现象^[5-6]。学者们已从农业干旱脆弱性做了大量研究^[7-8], 城市灾害脆弱性研究多针对洪涝与台风等灾害^[9-10]。本文基于前人对城市干旱脆弱性的定义, 即“城市干旱脆弱性为城市系统对城市干旱的敏感性以及由于缺乏应对能力而使系统易于遭受损失的性质和状态, 是城市的内在属性, 主要通过对于干旱的敏感性和应对能力表现出来”^[11]来探讨城市干旱脆弱性。

目前, 灾害脆弱性领域较成熟的分析模型主要有: 风险-灾害(RH)模型^[12-13]、压力释放(PAR)模型^[14]、基于区域的综合脆弱性、恢复力方法以及政治经济描述方式等。脆弱性领域较为成熟的评价方法主要有: 综合指数法、图层叠置法、脆弱性函数模型评价法、模糊物元评价法和危险度分析法等^[15]。因基于区域的综合脆弱性评价模型强调以区域为单位, 从社会、经济、环境等方面综合衡量系统脆弱性, 能够兼顾承灾系统的要素复杂性, 用于城市干旱脆弱性评估更为合适, 因此, 本文利用熵值法和贡献度模型, 在基于区域的综合脆弱性评价框架下, 评价河西绿洲各城市

基金项目: 国家自然科学基金项目(40961035)、甘肃省自然科学基金项目(0803RJZA094)和西北师范大学第三期科技创新团队项目资助。

* 通讯作者(fmlpx@nwnu.edu.cn)

作者简介: 雍国正(1989—), 男, 甘肃康乐人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区域环境与绿洲建设。E-mail: frankyong@yeah.net

的干旱脆弱性。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

河西绿洲地处 37°17'~42°48' N, 93°23'~104°12' E, 南靠青藏高原北部边缘与青海省相接, 北连马鬃山、合黎山和龙首山, 东起乌鞘岭, 西至陇、新两省交界。行政区域包括武威、金昌、张掖、嘉峪关和酒泉五地级市, 辖 19 县区。东西长约 1 000 km, 南北宽约 50~100 km, 总面积约 $2.7 \times 10^3 \text{ km}^2$, 约占全省面积的 60%。地貌为南部祁连山区, 北部北山区, 中部走廊平

原区, 具有绿洲、戈壁、沙漠及内陆河流等多种区域性地貌类型, 是气候变化的敏感区, 生态的脆弱区。河西绿洲属暖温带大陆性干旱气候, 降水自东南向西北递减, 年均降水量均在 200 mm 以下, 局地降水不足 50 mm, 蒸发强烈, 风大且频繁, 冬春干旱少雨且严寒, 夏季多暴雨而冷暖变化大, 是典型的内陆干旱区。

1.2 研究方法

1.2.1 指标体系的建立 在科学性、完整性及数据可获取的原则指导下, 根据城市对干旱脆弱性的概念, 从敏感性和应对能力两个方面建立指标体系(表 1), 进行综合评价。

表 1 城市干旱脆弱性评价指标及其权重
Table 1 Evaluation indicators of urban vulnerability to drought and the weight

目标层	准则层		指标层	
	变量	权重	因子(单位)	权重
城市干旱脆弱性	生态敏感性	0.099 8	X1 城市绿地面积(hm^2)	0.045 6
			X2 工业废水排放强度($10^4\text{t}/\text{hm}^2$)	0.054 2
			X3 单位水量 GDP(元/t)	0.044 9
	经济敏感性	0.154 2	X4 单位水量工业产值(元/t)	0.053 5
			X5 单位水量农业产值(元/t)	0.055 8
			X6 人均日常生活用水量(L)	0.045 3
	社会敏感性	0.176 6	X7 用水人口密度(人/ km^2)	0.043 3
			X8 老人与小孩占总人口比重(%)	0.040 2
			X9 城市登记失业率(%)	0.047 7
城市对干旱的应对能力	自然条件	0.132 4	X10 多年平均年降水量(mm)	0.041 5
			X11 多年平均年蒸发量(mm)	0.053 8
			X12 多年年平均温度($^{\circ}\text{C}$)	0.037 1
			X13 有效灌溉面积占耕地面积比(hm^2)	0.052 7
			X14 人均公园绿地面积(m^2)	0.057 6
			X15 工业废水排放达标率(%)	0.058 1
	自然资源	0.110 3	X16 工业固体废弃物处理率(%)	0.051 7
			X17 人均抚恤金(元)	0.039 2
	技术资源	0.109 7	X18 职工参加养老保险人数比(%)	0.040 8
			X19 人均地方财政收入(元)	0.043 8
	社会资源	0.080 0	X20 城镇居民可支配收入(元)	0.050 0
			X21 万人拥有卫生机构人员数(人)	0.043 4
金融资源	0.093 7			
人力资源	0.043 4			

一级指标有城市对干旱的敏感性和应对能力。城市是一个社会-经济-生态复合为一体的系统, 分析其敏感性应从生态敏感性、经济敏感性和社会敏感性 3 方面进行。水资源是城市系统维持运行的基本保障, 用城市绿地面积和工业废水排放强度表征生态敏感性。一般而言, 城市是第二、三产业高度集中的地方, 以工业用水为主; 然而, 河西地区向来被誉为甘肃乃至全国的用粮基地, 其农业价值非常突出, 因此经济敏感性用单位水量工业产值、单位水

量农业产值和单位水量 GDP 表示。水约占人体组成的 70% 左右, 缺水很容易导致各种卫生问题: 如空气质量降低、呼吸系统发病率升高、环境质量恶化等, 严重时能导致个人头晕目眩甚至人员伤亡, 由于老年人和儿童的身体素质较差以及免疫力相对较弱, 更容易受到危害, 故以老人与小孩占总人口比重、人均日常生活用水量、城市用水人口密度、城市登记失业率来表征社会敏感性。

城市对干旱的应对能力是指一个城市在干旱灾

害的影响下能够维持稳定、健康发展的能力。本文借前人可持续性分析框架^[16]，从人力、自然、金融、技术和社会资源 5 个维度拟定城市的干旱灾害应对能力。其中，自然条件包括年均降水量、年均蒸发量和年均温度，用以说明城市的背景条件。绿地对城市的气候调节有重要的作用，绿地的有效灌溉也是城市绿化的重要保证，因此以人均绿地面积和有效灌溉面积占耕地面积比来表征城市应对干旱的自然资源。废水及固体废弃物处理和提高用水效率是应对城市干旱的重要措施之一，因此，选用工业废水排放达标率、工业固体废弃物处理率表征技术资源。应对城市干旱的社会资源包括节水意识、社会制度与社会保障等，这里以人均抚恤金和职工参加养老保险人数比来反映城市应对干旱的社会资源。金融资源表示城市的经济力量，本文以人均地方财政收入和城市居民可支配收入分别衡量政府和居民家庭的应对能力。城市干旱的影响主要有城市缺水、环境破坏和人类的健康威胁等，以至于人们的普遍发病率高于平常，这里以万人拥有卫生机构人员数作为应对干旱的人力资源。

1.2.2 数据源与数据标准化 数据来源于《甘肃统计年鉴(2011)》以及《中国城市统计年鉴(2011)》和甘肃1980—2010年31年年均气温、降水量及蒸发量等数据。进行城市干旱脆弱性评价，首先需对指标数据进行无量纲的标准化处理。在脆弱性评价中，正向指标与负向指标对评价结果具有不同作用，需区别对待。假设共有 n 个评价对象， m 个评价指标； i 代表评价对象， j 代表评价指标，则 X_{ij} 表示第 n 个评价对象的第 j 个指标值。对正向指标处理为：

$$S_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}(X_j)}{\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)} \quad (1)$$

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

对于负向指标处理为：

$$S_{ij} = \frac{\text{Max}(X_j) - X_{ij}}{\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)} \quad (2)$$

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

式中： S_{ij} 表示 X_{ij} 经过无量纲化处理后的标准化值， $S_{ij} \in [0, 1]$ ， S_{ij} 越趋于0对脆弱性值贡献越小， S_{ij} 越趋于1对脆弱性值贡献越大。

1.2.3 确定指标权重 确定指标权重有主观赋权和客观赋权两类方法。主观赋权主观随意性较大，与客观赋权法相比科学性较差。在众多客观赋权法中，熵值法由于其既能反映指标信息的效应价值，又能克服指标间的信息重叠，被社会经济等研究领域广泛应用^[17]。因此，采用熵值法求取城市干旱脆弱性评价

指标的权重系数。计算步骤如下：

(1) 基于标准化数据 S_{ij} ，计算第 j 项指标下第 i 个样本的 S_{ij} 在 S_j 中的比重，从而构建矩阵 $P =$

$\{P_{ij}\}_{n \times m}$ ；计算公式为：

$$P_{ij} = S_{ij} / S_j \quad (3)$$

(2) 计算指标值的信息熵 e_j ：

$$e_j = -(1/\ln n) \times \sum (P_{ij} \times \ln P_{ij}) \quad (4)$$

(3) 求取指标差异性系数 g_j ：

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

(4) 确定指标权重 w_j ：

$$w_j = g_j / \sum g_j \quad (6)$$

以上各式中： $i = 1, 2, \dots, n$ ； $j = 1, 2, \dots, m$ 。

1.2.4 评价与分析模型 (1)脆弱性评价模型。根据对城市干旱脆弱性内涵的分析，城市干旱脆弱性主要包括对干旱的敏感性和应对能力两个方面；其中干旱敏感性由城市经济、社会、生态敏感性构成，应对能力则涉及金融、技术、人力、自然和社会资源等多方面。据此，构建城市干旱脆弱性评估模型：

$$UDV_i = \sum_{j=1}^{21} (w_j \times S_{ij}) \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 21)$$

式中： UDV 表示 i 城市对干旱的脆弱性程度； w_j 表示第 j 项评价标的权重； S_{ij} 表示 i 城市第 j 项指标的标准化值。

(2) 因子贡献度计算模型。脆弱性评估不仅要明确脆弱性的时空格局，更重要的是要明辨脆弱性的决定因素以及如何降低评价单元的脆弱性^[15]。识别脆弱性的主要贡献因子是降低脆弱性的关键所在，对干旱适应行为决策具有重要意义。考虑到脆弱性是越低越好，本文依据贡献度与障碍度的逻辑关系，将已有的因子障碍度模型^[18-19]改造为因子贡献度计算模型，用于分析负向目标的主要贡献因子：

$$C_j = \frac{F_j \times I_j}{\sum_{j=1}^{21} (F_j \times I_j)} \times 100\% \quad (8)$$

$$U_r = \sum C_j \quad (9)$$

式中： C_j 表示第 j 项指标因素对脆弱性的贡献度； U_r 表示第 r 准则因素对脆弱性的贡献度； I_j 为指标隶属度(单因子指标占脆弱性结果的比例，即单项指标因素评估值比100%，即为 S_j)； F_j 为单项指标因素对总目标的权重，计算公式为：

$$F_j = w_r \times w_j \quad (10)$$

式中： w_r 为第 r 准则层因素的权重； w_j 为第 j 项指标

的权重, S_j 与 w_r 、 w_j 分别按照上文数据标准化与指标权重确定方法计算。

1.2.5 脆弱性等级划分 目前,对城市干旱脆弱性的研究还比较少,在脆弱性等级划分上没有明确的标准。这里借鉴相关城市脆弱性研究成果^[19],将城市干旱脆弱性指数(UDV)在(0,1)范围划分为高($0.67 \leq \text{UDV} < 1$)、中($0.33 \leq \text{UDV} < 0.67$)、低($0 < \text{UDV} < 0.33$)3个等级。

2 结果分析

2.1 脆弱性分析

2.1.1 脆弱性分析 根据上述方法,分别计算出河西绿洲城市干旱的敏感性、应对能力和脆弱性(表 2)。从表 2 可以看出,河西绿洲城市干旱脆弱性总体处于中等水平,嘉峪关市处于低脆弱水平,武威市处于高脆弱水平。脆弱性强度以及应对能力的大小和敏感性差异均比较大(图 1)。脆弱性最高的城市是河西绿洲城市化最低的武威市,脆弱性最低则分布于城市化水平最高的嘉峪关市。可见,脆弱性的空间分异与城市

化水平基本一致。

2.1.2 敏感性分析 由图 1 和表 2 可见,金昌市干旱敏感性最高,其次为张掖市、武威市和酒泉市,嘉峪关市最低。其原因是:金昌市、武威市人口密度分别达 $48 \text{ 人}/\text{km}^2$ 和 $54 \text{ 人}/\text{km}^2$,是城市人口密度最小城市(酒泉市, $6 \text{ 人}/\text{km}^2$)的 8 倍和 9 倍左右,并且其老人与小孩占总人口的比重也大;金昌市、武威市和酒泉市城市登记失业率分别为 3.46%、3.25%、3.13%,嘉峪关市和张掖市相对比其低一些,因此,金昌市和武威市的社会敏感性更突出。嘉峪关市、酒泉市和金昌市绿地面积分别为 $1\,793$ 、 $1\,271$ 和 $1\,090 \text{ hm}^2$,张掖市和武威市绿地面积相对小点,另外,金昌市和嘉峪关市的工业废水排放强度为 $292.6 \text{ 万 t}/\text{hm}^2$ 和 $113.2 \text{ 万 t}/\text{hm}^2$,远远高于其他 3 城市,因此,金昌市和嘉峪关市的生态敏感性突出。张掖市、武威市和酒泉市的农业占了很大的比例,干旱严重影响着其农业发展,远高于嘉峪关市和金昌市的农业用水量使得其经济敏感性相当突出。

表 2 河西绿洲城市干旱脆弱性指数
Table 2 Drought index of urban vulnerability in Hexi oasis

城市	敏感性			应对能力					脆弱性	等级	
	生态敏感性	经济敏感性	社会敏感性	自然条件	自然资源	技术资源	社会资源	金融资源			人力资源
嘉峪关市	0.066 4	0.013 3	0.078 7	0.085 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.006 9	0.000 0	0.250 5	低
张掖市	0.015 0	0.115 8	0.084 1	0.043 1	0.056 7	0.066 3	0.070 0	0.090 0	0.035 4	0.576 3	中
武威市	0.000 7	0.105 0	0.102 1	0.073 6	0.104 7	0.109 7	0.080 0	0.088 6	0.043 4	0.707 7	高
酒泉市	0.026 9	0.118 0	0.055 4	0.130 3	0.032 3	0.020 9	0.067 8	0.052 7	0.030 3	0.534 5	中
金昌市	0.073 8	0.000 0	0.158 2	0.013 9	0.025 9	0.021 0	0.065 4	0.018 8	0.025 4	0.402 5	中

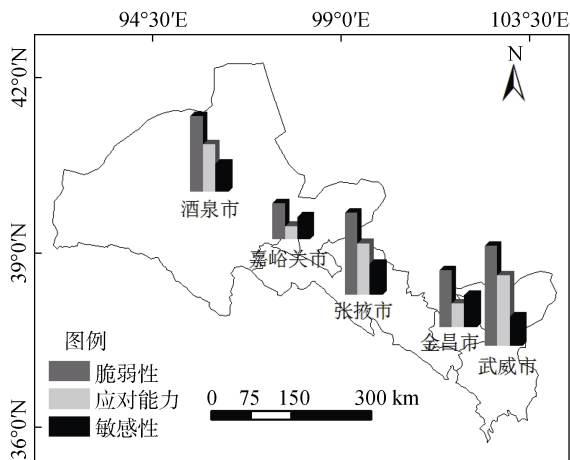


图 1 河西绿洲城市干旱脆弱性及其结构的空间差异
Fig. 1 Spatial difference of urban vulnerability to drought and its structure in Hexi oasis

2.1.3 应对能力分析 应对能力与脆弱性是相反的,所以在脆弱性综合评价中是负向指标,得分越低

表示应对能力越强。根据图 1 与表 2 来看,河西绿洲各城市的干旱应对能力差异较大。干旱应对能力最强的是嘉峪关市(0.092 2),作为长城西端的第一重关,也是古“丝绸之路”的交通要道,嘉峪关市应对干旱的资金和社会力量较大。金昌市作为祖国的“镍都”,拥有丰富的矿产资源,其应对干旱的能力仅次于嘉峪关市为(0.170 4)。其次是,酒泉市(0.344 3)和张掖市(0.361 5),武威市的干旱应对能力最低(0.500 0)。武威市人均绿地面积较小,应对干旱的技术资源和自然资源潜力相对较小。

2.2 因子贡献度分析

根据前面的评价,进一步进行分析各城市对干旱脆弱性的主要贡献因子。通过分别计算出指标层和准则层各因子的贡献度(表 3 和表 4),进而分别提出降低各市干旱脆弱性的有效路径,得到城市脆弱性的公共贡献因子,以为城市发展与建设提供一些有用建议。

表 3 河西绿洲城市准则层因子贡献度(%)
Table 3 Contribution of principle factors of urban vulnerability to drought in Hexi oasis

城市	干旱敏感性			应对能力					
	生态敏感性	经济敏感性	社会敏感性	自然条件	自然资源	技术资源	社会资源	金融资源	人力资源
嘉峪关市	20.99	6.29	40.28	30.33	0.00	0.00	0.00	2.11	0.00
张掖市	2.27	28.38	19.64	6.79	10.11	11.81	6.83	12.14	2.03
武威市	0.09	20.42	19.40	10.08	15.75	16.33	6.31	9.61	2.01
酒泉市	3.96	29.89	13.91	25.40	6.62	3.96	7.04	7.38	1.85
金昌市	16.34	0.00	53.04	4.22	6.61	5.51	8.93	3.30	2.05

表 4 河西绿洲城市指标因子对干旱脆弱性的贡献程度(%)
Table 4 Contribution of indicators of urban vulnerability to drought in Hexi oasis

准则层因子	指标层因子	嘉峪关市	张掖市	武威市	酒泉市	金昌市
生态敏感性	X1	13.60	1.08	0.00	3.96	3.81
	X2	7.39	1.19	0.09	0.00	12.53
经济敏感性	X3	4.84	7.18	6.57	10.09	0.00
	X4	1.31	6.53	6.12	14.32	0.00
	X5	0.14	14.67	7.74	5.47	0.00
社会敏感性	X6	18.61	6.34	0.12	0.00	15.51
	X7	21.68	3.04	5.35	0.00	8.12
	X8	0.00	7.15	6.79	6.60	12.22
	X9	0.00	3.11	7.14	7.31	17.19
自然条件	X10	14.94	3.12	2.77	7.39	0.00
	X11	4.06	0.00	2.81	12.41	4.22
	X12	11.33	3.68	4.50	5.60	0.00
自然资源	X13	0.00	9.33	6.74	0.35	4.52
	X14	0.00	0.78	9.02	6.27	2.09
技术资源	X15	0.00	3.15	9.12	1.12	3.85
	X16	0.00	8.66	7.22	2.84	1.66
社会资源	X17	0.00	3.32	3.02	3.50	4.68
	X18	0.00	3.51	3.28	3.54	4.25
金融资源	X19	0.00	5.01	4.43	4.51	3.30
	X20	2.11	7.13	5.18	2.86	0.00
人力资源	X21	0.00	2.03	2.01	1.85	2.05

2.2.1 准则层贡献因子 从表 3 可以看出,每个因子对河西 5 市干旱脆弱性的贡献度都不相同。按照贡献度 $C \geq 10\%$ 的标准,得到准则层主要贡献因子。其中,各市脆弱性最高的主要贡献因子为社会敏感性。较高的社会与生态敏感度以及自然条件的限制是嘉峪关市干旱脆弱性的主要成因,三者贡献度达 90% 以上。张掖市脆弱性因子结构主要为经济、社会敏感性和金融、技术以及自然资源,贡献度为 82.08%。武威市主要贡献因子为经济、社会敏感性和技术与自然资源,另外其自然条件也是很重要的制约因素,贡献度共达 81.98%。酒泉市的脆弱性因子主要为经济敏感性、自然条件和社会敏感性,三者贡献度为 69.2%。社会和生态敏感性是金昌市干旱脆弱性的主要因子,此外,社会资源也是金昌市应对干旱能力的主要制约

因子,三者贡献度为 78.31%。综上所述,社会、生态敏感因子和自然条件为嘉峪关市和金昌市干旱脆弱性的主要贡献因子,经济、社会敏感因子和自然条件以及应对能力是张掖市、武威市和酒泉市干旱脆弱性的主要贡献因子。按其比例关系,嘉峪关市和金昌市为敏感性主导型,贡献度分别达 63.22%、57.65%,降低敏感性是降低干旱脆弱性关键所在;武威市、张掖市和酒泉市则为应对能力主导型,贡献度分别为 70.64%、62.72%和 62.54%,提高应对能力能够有效地降低其干旱脆弱性。

2.2.2 指标层贡献因子 在 21 个指标层因子中,本研究提取贡献度排在前面的 5 个因子作为主要贡献因子。从表 4 可知,主要贡献因子表现在自然条件、经济和社会敏感性 3 方面,其中,人力资

源因子对河西绿洲城市干旱脆弱性没有太大的影响。5 城市中嘉峪关市脆弱性贡献度最大的是用水人口密度(21.68%)、人均日常生活用水量(18.61%)和多年年均降水量(14.94%)，其次是城市绿地面积(13.60%)和多年年平均温度(11.33%)。因此，嘉峪关市应当加大城市节水力度，增强居民节水意识，以降低干旱敏感性；同时增加绿地面积，来增强干旱应对能力，降低脆弱性。张掖市脆弱性贡献度最大的是单位水量农业产值(14.67%)、有效灌溉面积占耕地比(9.33%)和工业固体废弃物处理率(8.66%)，其次是单位水量 GDP(7.18%)和老人与小孩占总人口比重(7.15%)。因此，应加大措施、改进技术，加强改善张掖市的农业用水量及其方式，应用滴管等节水的农业灌溉方式；同时控制人口增长，优化人口结构。武威市脆弱性贡献因子主要是工业废水排放达标率(9.12%)、人均公园绿地面积(9.02%)和单位水量农业产值(7.74%)，其次是工业固体废弃物处理率(7.22%)及城市登记失业率(7.14%)。因此，应提高武威市污水及固体废弃物处理率，多植树增加绿地面积，加强节水教育，提高农业用水效率，增加城市就业率等。酒泉市脆弱性贡献度最大的是单位水量工业产值(14.32%)、多年年均蒸发量(12.41%)和单位水量 GDP(10.09%)，其次是多年年均降水量(7.39%)及城市登记失业率(7.31%)。因此，应提高酒泉市的工业用水效率，提倡循环利用，扩展就业渠道，增加就业岗位等。金昌市干旱脆弱性贡献度最大的是城市登记失业率(17.19%)、人均日常生活用水量(15.51)和工业废水排放强度(12.53%)，其次是老人与小孩占总人口比重(12.22%)。因此，金昌市应增加就业渠道，加强社会教育提高居民节水意识，加强对工业污水排放的监管力度，进一步实施计划生育基本国策，控制人口数量，从而降低其干旱脆弱性。

3 结论

(1) 河西绿洲城市干旱脆弱性处于中高等水平，但脆弱性程度存在一定的差异，脆弱性的空间差异与城市化水平基本一致。武威市最脆弱，其次是张掖市、酒泉市和金昌市，嘉峪关市干旱脆弱性最小。

(2) 城市干旱敏感性与城市化水平关系密切；城市干旱应对能力受社会经济发展水平与自然因素的共同制约，城市绿化和有效灌溉面积等自然因素有着更大的影响。

(3) 河西绿洲城市干旱脆弱性基本是敏感性、自然条件和应对能力主导型脆弱，其中嘉峪关市为社会—

生态敏感性因子和自然条件因子主导型，张掖市为经济—社会敏感性因子和金融、技术及自然资源因子主导型，武威市为受经济—社会敏感性因子和技术—自然资源和自然条件复合主导型，酒泉市为经济敏感性因子和自然条件及社会敏感性主导型，金昌市为社会—生态敏感性因子主导型。

(4) 准则层因子贡献度表明，河西地区城市干旱脆弱性的主要成因是：城市社会系统对干旱极低的应对能力，应对干旱的技术和自然资源严重不足，城市社会系统对干旱的超强敏感。从指标层因子贡献度来看，对嘉峪关市和金昌市脆弱性影响最大的是人均日常生活用水量和用水人口密度及工业废水排放强度。张掖市、武威市和酒泉市干旱脆弱性影响最大的因子是单位水量农业产值和单位水量 GDP 及多年年均蒸发量。

参考文献：

- [1] 陈鹏, 邱新法, 曾燕. 城市干旱风险评估[J]. 生态经济, 2010(7): 158-161
- [2] 翁白莎, 严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 309-316
- [3] 秦冰. 模糊综合评价法在城市旱情评价中的应用[J]. 水利规划与设计, 2007(2): 25-27
- [4] Kates RW, Clark WC, Corell R, Hall JM. Environment and development: Sustainability science[J]. Science, 2001, 292: 641-642
- [5] 鲁渊平, 杜继稳. 气候变化与城市发展对城市气象灾害的影响与对策[J]. 灾害学, 2008, 23(S1): 7-10
- [6] American Meteorological Society. Meteorological drought policy statement[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1997(78): 847-849
- [7] 商彦蕊. 干旱、农业旱灾与农户旱灾脆弱性分析——以邢台县典型农户为例[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 55-61
- [8] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 田亚平. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析与定量评价[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78-83
- [9] 石勇. 灾害情景下城市脆弱性评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010
- [10] 陈香. 沿海地区台风灾害系统脆弱性过程诊断与评估[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 6-10
- [11] 喻忠雷, 杨新军, 石育中. 关中地区城市干旱脆弱性评价[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 581-588
- [12] Burton I, Katers RW, White GF. The Environment as Hazard[S]. Oxford: Oxford University Press, 1978
- [13] Kates RW, Ausubel JH, Berbertan M. Climate impact assessment studies of the interaction of climate and society[R]. Climate Impact Assment, 1985
- [14] Blarkre P, Cannon T, Davis I. At Risk: Natural Hazards, Peoples Vulnerability and Disasters[R]. London: Routledge, 1994

- [15] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18–25
- [16] Roberts MG, 杨国安. 可持续发展研究方法国际进展——脆弱性分析方法与可持续生计方法比较[J]. 地理科学进展, 2003, 22 (1): 11–21
- [17] 欧向军, 甄峰, 秦永东. 区域城市化水平综合测度及其理想驱动分析[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1 430–1 439
- [18] 鲁春阳, 文枫, 杨庆媛, 陈琳琳, 宗会明. 基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 535–541
- [19] 苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(4): 454–464

Evaluation of Vulnerability to Drought in Hexi Oasis

YONG Guo-zheng, LIU Pu-xing*, YAO Yu-long, CHEN Li-li, GAO Yuan, WANG Yun
(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Using the entropy method and the model of contribution, the drought vulnerability and its major contribution factors in Hexi oasis were analyzed. The results showed that: the drought vulnerability in Zhangye City, Jiuquan City and Jinchang City were in the medium level, which in Jiayuguan City was in the low level and in Wuwei City was in very high level. The spatial differentiation of drought vulnerability in Hexi oasis was consistent with urbanization level, the sensitivity to drought was closely related with urbanization level, and the ability to cope with drought was affected by economic development and natural factors, but the former's effect was more than the latter. The main contribution factors were not the same in the index hierarchy of drought vulnerability among different cities, but shared generally a convergence trend, mainly in reflected in social drought sensitivity and response to drought, natural conditions, etc. Finally, corresponding countermeasures were put forward to drought vulnerability.

Key words: Hexi oasis, Drought, Vulnerability, Evaluation, Countermeasure