

西北地区城市干旱脆弱性评价研究

王晨¹, 黄馨², 黄晓军^{1,3}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘要: 干旱是制约中国西北地区社会经济发展的主要自然灾害。以西北地区 51 个地级市(自治州、地区)为研究对象,采集社会经济统计数据、气象数据和遥感影像数据,从暴露度、敏感性、适应能力 3 个维度构建指标体系,运用函数模型法评价西北地区城市干旱脆弱性,揭示其空间分异特征,并应用障碍度模型识别影响城市适应能力的主要障碍因子,提出相应对策。结果表明:暴露度的高、低分布与降水量的低、高分布基本一致,适应能力空间规律性不显著,敏感性、脆弱性格局呈自东向西渐趋增加特征的趋势,敏感性格局与脆弱性格局相似;高脆弱性城市主要分布在新疆、甘肃西北部,根据脆弱性差异特征,将西北地区城市分为以下几种类型:高-高-高-高型、高-高-低-高型、低-高-高-高型、低-低-高-低型、低-低-低-低型;节水型城市、水库库容、人均水资源量是影响西北地区城市干旱适应能力的主要障碍因子。

关键词: 城市干旱脆弱性; 暴露度; 敏感性; 适应能力; 西北地区

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0114-08

Assessment of urban drought vulnerability of Northwest China

WANG Chen¹, HUANG Xin², HUANG Xiaojun^{1,3}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. College of Earth Science and Resource, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China)

Abstract: Drought is the main disaster that restricts the social and economic development of Northwest China. Taking 51 prefecture level cities (autonomous prefecture or region) of northwest China as the research objects, by collecting socio-economic statistical data, meteorological data and RS image data, this paper constructs index system from the perspectives of exposure, sensitivity, and adaptive capacity. By using function model and obstacle degree model, this paper assesses urban drought vulnerability of northwest China, reveals the spatial differentiation pattern, identifies the main obstacles affecting urban adaptive capacity and proposes countermeasures. The results are shown as follows: the degree of exposure has similar characteristics with precipitation, the spatial regularity of adaptive capacity is not obvious in spatial terms, the sensitivity and vulnerability increase from east to west, and sensitivity pattern is similar to that of vulnerability. High vulnerability cities are mainly distributed in Xinjiang Province and northwest Gansu Province, according to the characteristics of vulnerability differences, the cities of the northwest China are divided into the following types: high-high-high-high, high-high-low-high, low-high-high-high, low-low-high-low, and low-low-low-low. The main obstacles that affect urban adaptive capacity include whether it is a water-saving city, the reservoir capacity and the per capita water resources.

Key words: urban drought vulnerability; exposure; sensitivity; adaptive capacity; northwest China

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-09-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(自然科学类)(310827171012)

作者简介: 王晨(1992-), 女, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要从事人地系统脆弱性研究。

通讯作者: 黄晓军(1983-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事人地耦合系统脆弱性与恢复力研究。

1 研究背景

干旱是我国影响最深远、危害最严重的灾害之一。据中国气象数据网资料显示,公元前 206 - 1949 年间,我国发生较大旱灾 1056 次,平均每两年就发生一次大旱。不同于台风、暴雨、地震等瞬时破坏性大的灾害,干旱不会直接损害地表或人工建筑^[1],因此易被人忽视,城市往往缺乏应对干旱的灾前预警和灾后管理体系。但干旱持续时间长,影响范围广,发生频率高,加上城市人口密度大、经济活动集中,对灾害具有放大效应,使得干旱对城市的影响更为深远和广泛。科学评估城市面对干旱的风险与不利因素,是提高城市防旱抗旱能力的重要途径。

脆弱性最早起源于 20 世纪 60 年代末的自然灾害研究,后逐渐进入到生态学、社会经济等领域。随着研究的不断深入,脆弱性内涵也逐渐丰富^[2]。脆弱性多被理解为系统容易受到影响或破坏的程度,暴露度(exposure)、敏感性(sensitivity)和适应能力(adaptive capacity)是理解和评估脆弱性的 3 个核心维度^[3]。其中,暴露度是指系统受到外部扰动的程度,与扰动的强度、频率和持续的时间等相关;敏感性是指系统是否容易受到扰动影响的程度,通常取决于系统的内在结构特征;适应能力是系统能够应对、调整和适应外部扰动的能力,也包含从扰动的后果中恢复的能力,一般由适应主体的财富状况、技术水平、资本禀赋和管理能力等决定^[4-9]。国内外学者对干旱脆弱性展开了大量研究,Almail 等^[10]评价了苏丹东部加达里夫州农民的干旱脆弱性和适应能力;Monica 采用综合指数法,从社会、经济和基础设施 3 个维度对罗马尼亚南部 144 个社区进行干旱社会经济脆弱性评价^[11];Ali 等^[12]采集了 1960 - 2015 年期间社会经济统计数据,计算了 46 个非洲国家的干旱脆弱性指数,并对 2020 - 2100 年间的干旱脆弱性情景进行预测;石育中等^[13]从农户尺度分析黄土高原乡村干旱脆弱性,并从适应能力、适应策略和适应模式三个层面揭示适应机理;侯光良等^[14]对青海东部农业区 22 个县进行干旱脆弱性分级,并提出了强化旱灾的风险管理、倡导节约型水资源开发利用等干旱防范措施;王莺等^[15]从水资源脆弱性、经济脆弱性、社会脆弱性、农业脆弱性和防旱抗旱能力脆弱性 5 个维度,对中国南方省市农业干旱脆弱性进行了评价。

纵观国内外干旱脆弱性研究,研究对象多为农业系统^[16-17],研究尺度主要以农户、社区和城市为

主^[18-20],缺乏跨区域尺度上的比较研究。由于干旱脆弱性评价可以对城市容易受到干旱扰动影响的程度以及城市应对干旱灾害的能力进行量化和测度,因此,干旱脆弱性评价成为该领域的主要研究内容,尽管评价方法日趋多元化^[21-24],但在指标选取、权重确定方法以及量化模型等方面仍有待于探讨,亟需进一步研究城市干旱脆弱性评价内容、方法,并丰富相关研究案例。

西北地区偏居内陆,常年降水较少导致地区干旱频发,在全球气候变暖背景下西北地区极端干旱事件发生频率和强度显著增加^[25],据气象部门统计,1949 - 1999 年,西北地区共发生 22 次干旱,其中重旱、特大旱发生 14 次,干旱是制约中国西北地区农业生产、社会经济发展和生态文明建设的主要灾害类型^[25]。如何降低西北地区城市干旱脆弱性,提高城市应对干旱灾害的能力,是关系到我国西北地区以及丝绸之路经济带可持续发展的关键。基于此,本文采用 VSD 框架,通过构建城市干旱脆弱性评价指标体系,应用函数模型法对西北地区城市干旱脆弱性程度进行量化评估,揭示西北地区城市干旱脆弱性的空间分异格局,并探讨限制城市适应能力的主要障碍因子,进而有针对性的提出提高城市适应干旱环境能力的路径与对策,为西北地区社会经济可持续发展与丝绸之路经济带建设提供科学的决策依据。

2 数据与研究方法

2.1 研究区概况

中国西北地区行政区划上包括陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆 5 省(自治区),区域总面积 $310 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国总面积的 32%。截止 2017 年底,该区域常住人口 1.01×10^8 人,城镇化率 51.84%,GDP 总量 46592.63×10^8 元。西北地区地处欧亚大陆腹地,属温带大陆性气候,绝大部分地处干旱和半干旱气候区,仅陇东南和陕南地区为半湿润及湿润气候区。本文主要以西北地区的地级行政单元(地级市、自治州、地区)为主要研究对象,由于新疆自治区兵团城市规模相对较小,且较难获取数据,因此,本文研究对象不包括新疆自治区兵团城市,最终确定的地级研究单元共计 51 个。

2.2 数据来源

本研究涉及的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);遥感影像数据来源于地理空间数据云 MODIS 中国合成产品;社会经济统计数

据来源于2016年西北五省(区)及各市(自治州、地区)的统计年鉴、中国城市统计年鉴、区域经济年鉴、国民经济和社会发展统计公报、水利与水资源公报等。

2.3 脆弱性评价指标体系

根据脆弱性的概念与内涵,本文从暴露度、敏感性和适应能力3个维度构建城市干旱脆弱性评价指标体系(表1)。

表1 西北地区城市干旱脆弱性评价指标体系

目标层	准则层	参数层	指标层	指标权重	指标性质
干旱脆弱性	暴露度(+)	扰动强度	E_1 多年平均降水量/mm	0.3885	-
			E_2 年平均气温/°C	0.3680	+
			E_3 降水距平百分率/%	0.2435	-
	敏感性(+)	社会敏感性	S_1 人口密度/(人·km ⁻²)	0.2287	+
			S_2 农业人口比重/%	0.0301	+
			S_3 人均用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)	0.2191	+
		经济敏感性	S_4 农作物播种面积/10 ⁴ hm ²	0.1354	+
			S_5 第一产业产值占比/%	0.0688	+
			S_6 万元GDP用水量/m ³	0.2491	+
	适应能力(-)	生态敏感性	S_7 NDVI 指数	0.0689	+
			资源禀赋	A_1 人均水资源量/m ³	0.1611
		经济水平	A_2 人均GDP/元	0.0424	+
			A_3 全市居民人均可支配收入/元	0.0335	+
			技术条件	A_4 节水灌溉面积/10 ⁴ hm ²	0.0916
		防旱抗旱	A_5 水库库容/10 ⁴ m ³	0.1739	+
			A_6 水利、环境和公共设施管理业固定资产投资/10 ⁸ 元	0.0930	+
社会资源	A_7 是否为节水型城市	0.3751	+		
	A_8 在校学生比例/%	0.0293	+		

注:(1)暴露度和敏感性能加剧脆弱性,适应能力能减缓脆弱性,故暴露度与敏感性指标性质为“+”,适应能力指标性质为“-”;(2)指标层的具体指标对应于准则层,当指标值越大对上一级越有利时,指标性质为“+”,反之为“-”;(3)NDVI指数来源于MODND 1M中国500M NDVI月合成产品,选取当年8月NDVI栅格数据集,在ArcGis10.2软件中应用分区统计工具计算各市矢量范围内NDVI平均值。

暴露度反映城市受干旱影响的程度,多年平均降水量和年平均气温反映城市的气候特征,降水距平百分率表征当年降水与往年平均状态的偏离程度,这3个指标用以反映城市受干旱扰动的强度。敏感性反映城市是否容易受到干旱环境影响的程度,可通过城市的社会结构、经济结构、生态结构等属性特征来反映,其中,人口密度和农业人口比重反映社会群体受干旱影响的概率,人均用水量反映社会对水资源的利用效率,这3个指标用以表征干旱胁迫下的社会敏感性;城市经济生产活动以水为载体,农业灌溉用水占总用水量的63.5%^[26],对干旱环境最为敏感,单位GDP用水量反映城市经济活动用水效率,采用农作物播种面积、第一产业产值占比和单位GDP用水量表征城市经济敏感性;NDVI指数反映城市植被覆盖状况,干旱环境易造成农作物枯萎、森林火灾等,用NDVI指数表征城市生态敏感性。适应能力反映城市应对、调整 and 适应干旱环境导致的不利影响的能力,本文主要选取了人均水资源量、人均GDP、全市居民

人均可支配收入、节水灌溉面积、水库库容、水利、环境和公共设施管理业固定资产投资、是否为节水型城市 and 在校学生比例等8个指标来衡量,其中,人均水资源量反映了城市抵御干旱的资源禀赋;人均GDP、全市居民人均可支配收入从总体经济规模、城市居民收入等方面反映了城市抵御不利影响的能力,城市经济发展水平越高,可投入到应对风险和不利影响的资金规模越大,应对与抵抗风险的能力也越强;节水灌溉技术是提高农业用水效率、改善生产条件的重要手段,采用节水灌溉面积表征城市应对干旱的技术水平;水利、环境和公共设施管理业固定资产投资和水库库容2个指标反映城市直接在水利与水资源基础设施方面的投入和应对能力;是否为节水型城市反映城市用水管理能力,该指标可用二值化表示,1代表是,0代表否;在校学生比例反映居民的教育水平,居民教育水平越高,节水意识相应越强,二者用以反映城市应对干旱的社会资源。

2.4 数据处理

2.4.1 数据标准化 在城市干旱脆弱性的测度中,为了消除原始数据量纲差异对评价结果的影响,采用极值法对原始数据进行标准化处理:

正向指标:指标值越大,对上一级目标越有利,采用正向指标标准化公式:

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

负向指标:指标值越大,对上一级目标越不利,采用负向指标标准化公式:

$$Y_{ij} = (X_{j\max} - X_{ij}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 j 项指标原始值; $X_{j\max}$ 、 $X_{j\min}$ 为第 j 项指标最大值和最小值; Y_{ij} 为第 j 项指标标准化值。

2.4.2 确定指标权重 在客观赋权法中,熵值法因其能根据数据间的信息差异,通过信息熵确定指标权重系数,消除人为因素干扰^[27],因此,本文采用熵值法计算城市干旱脆弱性评价指标的权重系数(表 1)。计算过程如下:

(1) 计算第 j 项指标下第 i 个研究单元指标值的比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (3)$$

(2) 计算第 j 项指标的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, k = 1 / \ln m \quad (4)$$

(3) 计算第 j 项指标的差异性系数 g_j :

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

(4) 计算第 j 项指标的权重 w_j :

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (6)$$

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

2.5 脆弱性评价模型与障碍因子识别

2.5.1 城市干旱脆弱性评价模型 将城市干旱脆弱性理解为暴露度、敏感性和适应能力的函数^[9],构建干旱脆弱性的评价模型:

$$DVI = f\{EI, SI, AI\} = (EI - AI) \times SI \quad (7)$$

式中: DVI 为干旱脆弱性指数; EI 为暴露度指数; SI 为敏感性指数; AI 为适应能力指数; DVI 的取值区间为 $(-1, 1)$; EI 、 SI 、 AI 取值区间均为 $(0, 1)$ 。

公式(7)表示干旱脆弱性与暴露度呈正比,与适应能力成反比,敏感性对脆弱性具有乘数效应,可能加剧或缓解脆弱性程度。

EI 、 SI 、 AI 计算公式如下:

$$EI = \sum_{j=1}^3 (W_{ej} Y_{ej}) \quad (8)$$

$$SI = \sum_{j=1}^7 (W_{sj} Y_{sj}) \quad (9)$$

$$AI = \sum_{j=1}^8 (W_{aj} Y_{aj}) \quad (10)$$

式中: W_{ej} 、 Y_{ej} 为暴露度的指标权重和标准化值; W_{sj} 、 Y_{sj} 为敏感性的指标权重和标准化值; W_{aj} 、 Y_{aj} 为适应能力的指标权重和标准化值。

2.5.2 城市干旱适应能力障碍因子识别 为降低城市干旱脆弱性,提高城市应对干旱的适应能力,本文引入障碍度模型^[28],计算适应能力维度各指标的障碍度。计算公式如下:

$$I_{ij} = 1 - Y_{ij} \quad (11)$$

$$O_j = I_{ij} W_j / \sum_{j=1}^n (I_{ij} W_j) \times 100\% \quad (12)$$

式中: Y_{ij} 为第 j 项指标的标准化值; I_{ij} 为指标偏离度,表示第 j 项指标的标准化后的值与 100% 间的差距^[29]; W_j 为第 j 项指标的权重; O_j 为障碍度,表示单项指标对适应能力的障碍程度。

3 结果分析

分别计算各研究单元暴露度、敏感性、适应能力和干旱脆弱性值,借助 ArcGIS10.2 软件采取自然断裂点法将上述数据划分为 5 个等级,依次为低、较低、中等、较高和高值区,空间分异格局如图 1 所示。

3.1 暴露度

西北地区城市干旱暴露度指数平均值为 0.5943。其中,低度和较低度暴露度指数的城市 19 个,占比 37.25%,主要分布在陕南、青海及北疆地区;中度暴露度指数的城市 11 个,占比 21.57%,分布较为分散,陕北、关中、陇东、宁夏南部、东疆和南疆皆有少量分布;高度和较高度暴露度指数的城市 21 个,占比 41.18%,主要分布在关中、宁夏、甘肃及南疆地区。

表征暴露度指数的 3 个指标中,多年平均降水量和年平均气温反映了当地的降水和蒸发水平,常年降水少、蒸发旺盛的地区,更易发生干旱。受季风和地形的双重影响,我国的降水总体上由东南向西北递减,西北地区的水汽主要集中在东部的秦巴山地、陇南山地和西部的天山北部,中部水汽相对较少,暴露度的高、低分布与降水量的低、高分布基本一致;年平均气温和多年平均降水量权重相当,虽然关中地区降水量在西北地区处于较高水平,但其地处亚洲夏季风边缘,秦岭的阻隔使得该地焚风效应显著,此外,关中地区城市密集,人口密度大,盆地的

地形使得热量容易聚集,伴随着全球变暖,极端高温事件频发,关中地区城市如西安、咸阳、渭南年平均气温远高于其他内陆城市,暴露度水平较高。青海省由于海拔较高,年平均气温较低,相较于其他省份,蒸发相对较弱,暴露度也较低。降水距平百分率反映某一时段降水与同期平均状态的偏离程度,降水距平百分率在 $-25\% \sim 25\%$ 范围内为正常水平,

大于 25% 降水偏多,小于 -25% 则降水偏少。2015年西北各市降水距平百分率基本处于正常降水范围内,仅西宁市为 -30% ,降水较往年偏少,新疆自治区城市降水距平大多大于 25% ,降水较往年较为丰富。由于西北地区降水总体偏少,即使当年没有发生严重旱灾,干旱环境下的水资源供需的矛盾仍影响着当地社会经济发展。

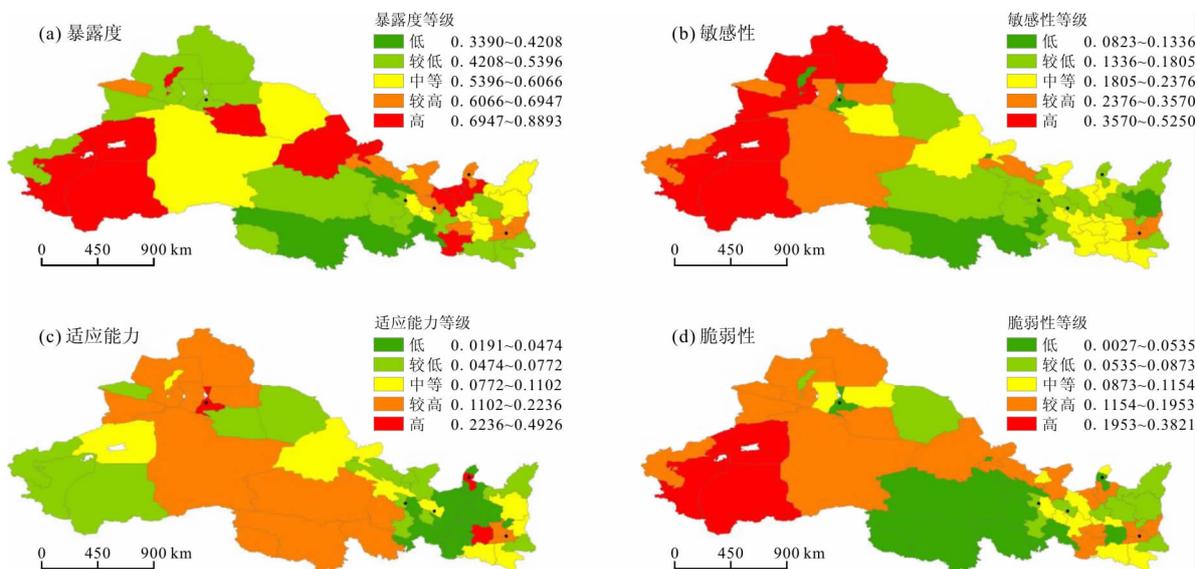


图1 西北地区城市干旱暴露度、敏感性、适应能力及脆弱性空间分布

3.2 敏感性

西北地区城市敏感性指数平均值为0.2296。其中,低度和较低度敏感性指数的城市24个,占比47.06%,集中分布在陕西、青海省;中度敏感性指数的城市13个,占比25.49%,陕南、宁夏南部、陇东、河西走廊、东疆地区皆有分布;高度和较高度敏感性指数的城市14个,占比27.45%,新疆最集中,关中地区、河西走廊有少量分布。敏感性等级总体上呈由东向西渐趋增加的趋势。西北地区城市人口密度平均值 $112.41 \text{ 人}/\text{km}^2$,关中地区的西安、咸阳、渭南3市,人口密度分别为 862.2 、 488.02 、 $408.09 \text{ 人}/\text{km}^2$,位居西北前三,远高于平均水平;此外,关中原自古水土肥沃,农业发达,是我国重要的商品粮基地,西北地区城市农作物播种面积平均值 $31.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$,西安、咸阳、渭南的农作物播种面积分布为 45.03×10^4 、 52.20×10^4 、 $68.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$,均位于平均水平之上,人口密度越大,农作物播种面积越大,对水资源的需求量也越大,城市社会经济系统对干旱敏感性更高,故关中地区西安、咸阳、渭南3市敏感性较高;高度和较高度敏感性等级的城市中,有10个位于新疆,其中敏感性最高的6个城市全部位

于新疆,缘于评价敏感性程度的指标中,人均用水量和单位GDP用水量权重较大,分别为0.2191和0.2491,这两个指标反映了城市社会、经济活动的用水效率,据统计,新疆人均用水量 2747.79 m^3 ,单位GDP用水量 $816.61 \text{ m}^3/10^4 \text{ 元}$,分别是西北地区其他城市平均水平的4.9倍和5.3倍,是陕西省平均水平的12.1倍和13倍。水资源浪费严重、用水效率低下导致新疆大部分城市对干旱敏感性强。

3.3 适应能力

西北地区城市适应能力指数平均值为0.1069,其中,低度和较低度适应能力的城市28个,占比54.90%,主要分布在宁夏、甘肃、青海东部和新疆部分地区;中度适应能力城市9个,占比17.65%,数量较少,分布较零散,陕西、甘肃和新疆皆有分布;高度、较高度适应能力指数城市14个,占比27.45%,主要分布在关中、青海和北疆。适应能力空间分异规律性不显著,高、低适应能力城市较为集聚,中等适应能力城市较为分散。城市适应能力水平的高低与其资源禀赋、经济实力、技术水平、社会资本和管理能力密切相关。高适应能力城市仅3个,分别为宝鸡、银川和乌鲁木齐,这3个城市是西北地区仅有

的 3 个“节水型城市”,城市用水管理能力强,能更为科学、合理地分配水资源,对城市干旱有更强的适应能力。适应能力较高的城市中,以西安为核心的关中城市群整体经济水平位居西北前列,可投入到应对风险和不利影响的资金规模更大,有着较强的风险抵御能力,适应能力更强;青海省山脉纵横,河湖众多,素有“中华水塔”之称,地表和地下水资源丰富,人均水资源量是全国平均水平的 5.3 倍,是西北其他城市的 9 倍,依托丰富的水资源,青海省城市在干旱胁迫下有着更强的适应能力;依托天山北坡经济带和油气资源开发,北疆地区及南疆的巴州工业化水平高,经济发达,在西北地区处于中等以上水平;此外,受地形影响,北疆地区降水量较为丰富,人均水资源量 4 619 m³/人,是甘肃的 3.7 倍,宁夏的 30.6 倍。依托发达的经济水平和丰富的水资源,北疆地区及南疆的巴州对于干旱有较强的适应能力。

3.4 城市干旱脆弱性

西北地区城市干旱脆弱性指数平均值为 0.1166,其中,低度和较低度脆弱性城市 21 个,占比 41.18%,主要分布在陕北、陇东、青海及部分省会城市;中度脆弱性城市 10 个,占比 19.61%,主要分布在陕南、陇东及北疆;高度和较高度脆弱性城市 20 个,占比 39.22%,主要分布在关中、宁夏南部、陇南、河西走廊和新疆。西北地区城市干旱脆弱性等级总体上呈由东向西渐趋增高趋势,高、低等级脆弱性城市空间上较连续,中等脆弱性城市较分散。从暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性的空间分异格局来看,暴露度和适应能力的空间分异并无明显的规律性,而敏感性的分异格局与脆弱性格局较为相似,大体上都呈由东向西渐趋增加的趋势。由脆弱性指数计算公式可知,敏感性对脆弱性具有乘数效应,可加剧或减轻脆弱性。根据各城市干旱脆弱性差异特征,采用 Origin8.6 软件绘制西北地区城市干旱脆弱性类型图,如图 2 所示。

图 2 中球的大小代表各城市干旱脆弱性高低,结合图 1、2,将西北地区城市划分为以下类型:(1) 类型 I:高-高-高-高型,该类型城市暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性都很高,典型城市西安市、咸阳等;(2) 类型 II:高-高-低-高型,该类型城市暴露度、敏感性高,而适应能力低,导致城市脆弱性高,典型城市有和田、喀什、张掖等;(3) 类型 III:低-高-高-高型,该类型城市暴露度低,敏感性、适应能力和脆弱性高,主要分布在北疆地区,如阿勒泰、塔城地区等;(4) 类型 IV:低-低-高-低型,该

类型城市低暴露度、低敏感性、高适应能力,脆弱性也相应较低,青海省城市最为典型;(5) 类型 V:低-低-低-低型,这类城市暴露度、敏感性、适应能力及脆弱性都较低,包括黄南州、甘南州、商洛市等。

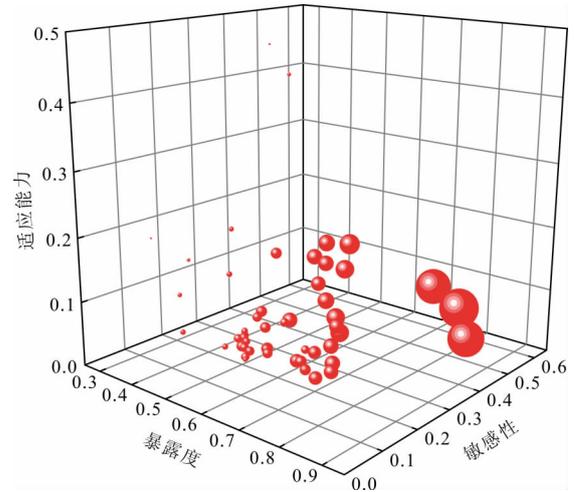


图 2 西北地区城市脆弱性类型

3.5 适应能力障碍因子分析

通过障碍度模型计算得出西北地区 51 个城市适应能力各指标的障碍度得分,从大到小进行排序,选取排名前 3 的因子,即影响各城市适应能力大小的主要障碍因子见表 2 所示。

各城市适应能力的主要障碍因子虽不完全一致,但存在着极大的相似性。根据计算结果,是否为节水型城市、水库库容、人均水资源量是出现频次最多的障碍因子,也是影响西北地区城市干旱适应能力及脆弱性的关键因素。48 个城市的第一障碍因子都是是否为节水型城市,占比 94%,反映了在有限的水资源下,城市用水管理能力是影响城市适应干旱环境的主要障碍;各城市的第二障碍因子中水库库容出现的频次为 45 次,占比 88%。水库是城市供水的主要来源^[30],由于西北地区城市降水量少,可供蓄存的水资源较少,加之城市经济水平与东部地区差距较大,政府用于水利建设等基础设施投资较少,导致西北地区大多数城市水库数量少,库容偏低,城市供水能力有待加强;人均水资源是各城市第三障碍因子中出现频次最多的指标,为 43 次,占比 84%,受区位条件的影响,除青海东部、陕南地区外,大部分城市水资源匮乏,随着社会经济的发展和城市化进程加快,城市对水资源的需求量越来越大,而西北地区城市水资源赋存量少、城市用水管理能力弱以及城市供水能力不足,导致水资源供需的矛盾已成为阻碍西北地区城市适应干旱环境的主要障碍。

表2 西北地区城市适应能力障碍因子及障碍度

研究单元	障碍度排序			研究单元	障碍度排序		
	1	2	3		1	2	3
西安市	A ₇ (43.77)	A ₅ (19.96)	A ₁ (18.72)	海北州	A ₇ (41.68)	A ₅ (17.81)	A ₁ (11.88)
铜川市	A ₇ (38.90)	A ₅ (17.95)	A ₁ (16.64)	黄南州	A ₇ (39.63)	A ₅ (16.97)	A ₁ (14.92)
宝鸡市	A ₆ (32.76)	A ₁ (31.20)	A ₄ (17.41)	海南州	A ₇ (48.32)	A ₁ (18.37)	A ₆ (11.91)
咸阳市	A ₇ (43.23)	A ₅ (19.60)	A ₁ (18.54)	果洛州	A ₇ (46.49)	A ₅ (19.12)	A ₆ (11.53)
渭南市	A ₇ (41.84)	A ₅ (19.17)	A ₃ (17.92)	玉树州	A ₇ (45.04)	A ₅ (20.69)	A ₆ (11.16)
延安市	A ₇ (41.12)	A ₅ (18.54)	A ₁ (17.56)	海西州	A ₇ (44.63)	A ₅ (20.39)	A ₁ (10.75)
汉中市	A ₇ (41.80)	A ₅ (18.39)	A ₁ (16.56)	银川市	A ₅ (31.91)	A ₁ (29.68)	A ₄ (15.34)
榆林市	A ₇ (40.29)	A ₅ (17.58)	A ₁ (17.14)	石嘴山市	A ₇ (39.38)	A ₅ (18.21)	A ₁ (16.88)
安康市	A ₇ (40.92)	A ₁ (16.43)	A ₅ (15.48)	吴忠市	A ₇ (39.27)	A ₅ (17.59)	A ₁ (16.85)
商洛市	A ₇ (39.54)	A ₅ (18.23)	A ₁ (16.60)	固原市	A ₇ (39.09)	A ₅ (17.43)	A ₁ (16.69)
兰州市	A ₇ (42.16)	A ₅ (19.53)	A ₁ (18.10)	中卫市	A ₇ (38.97)	A ₅ (17.31)	A ₁ (16.71)
嘉峪关市	A ₇ (40.17)	A ₅ (18.58)	A ₁ (17.25)	乌鲁木齐市	A ₅ (34.16)	A ₁ (31.49)	A ₄ (17.80)
金昌市	A ₇ (39.60)	A ₅ (18.26)	A ₁ (16.96)	克拉玛依市	A ₇ (41.37)	A ₅ (19.03)	A ₁ (17.71)
白银市	A ₇ (39.36)	A ₅ (18.22)	A ₁ (16.88)	吐鲁番市	A ₇ (39.99)	A ₅ (18.48)	A ₁ (16.72)
天水市	A ₇ (38.67)	A ₅ (17.93)	A ₁ (16.56)	哈密地区	A ₇ (40.08)	A ₅ (18.58)	A ₁ (16.50)
武威市	A ₇ (39.82)	A ₅ (18.36)	A ₁ (16.94)	昌吉回族自治州	A ₇ (44.08)	A ₅ (20.00)	A ₁ (17.99)
张掖市	A ₇ (40.20)	A ₅ (18.25)	A ₁ (16.46)	伊犁哈萨克自治州	A ₇ (43.30)	A ₅ (18.88)	A ₁ (16.87)
平凉市	A ₇ (38.69)	A ₅ (17.80)	A ₁ (16.55)	塔城地区	A ₇ (44.09)	A ₅ (20.17)	A ₁ (16.89)
酒泉市	A ₇ (41.51)	A ₅ (18.63)	A ₁ (17.13)	阿勒泰地区	A ₇ (43.49)	A ₅ (17.86)	A ₁ (13.19)
庆阳市	A ₇ (39.04)	A ₅ (17.58)	A ₁ (16.72)	博尔塔拉自治州	A ₇ (40.65)	A ₅ (18.84)	A ₁ (15.78)
定西市	A ₇ (38.24)	A ₅ (17.69)	A ₁ (16.34)	巴音郭楞自治州	A ₇ (44.21)	A ₅ (20.35)	A ₁ (15.63)
陇南市	A ₇ (38.44)	A ₅ (17.68)	A ₁ (16.15)	阿克苏地区	A ₇ (41.52)	A ₅ (18.85)	A ₁ (16.87)
临夏州	A ₇ (40.27)	A ₁ (17.25)	A ₅ (13.58)	克孜勒苏自治州	A ₇ (39.51)	A ₅ (18.29)	A ₁ (13.54)
甘南州	A ₇ (39.31)	A ₅ (17.41)	A ₁ (14.24)	喀什地区	A ₇ (40.55)	A ₅ (17.76)	A ₁ (16.89)
西宁市	A ₇ (39.91)	A ₅ (18.32)	A ₁ (16.99)	和田地区	A ₇ (39.94)	A ₅ (18.27)	A ₁ (15.64)
海东市	A ₇ (39.34)	A ₅ (17.45)	A ₁ (16.67)				

4 结论与对策

(1)西北地区城市干旱暴露度的高、低分布与降水量的低、高分布较为相似;适应能力等级空间规律性不显著,高、低适应能力城市较为聚集,中等适应能力城市较为分散;敏感性、脆弱性呈自东向西渐趋增加的空间分异特征,敏感性空间分异格局与脆弱性格局相似。

(1)高脆弱性城市主要分布在新疆、甘肃西北部,低脆弱性城市主要分布陕西和青海。根据脆弱性差异特征,西北地区城市可分为以下几种类型:高-高-高-高型、高-高-低-高型、低-高-高-高型、低-低-高-低型、低-低-低-低型。

(3)节水型城市、水库库容、人均水资源量是影响城市干旱适应能力的主要障碍因子,反映了西北地区城市在水资源禀赋、城市用水管理能力及水利

基础设施建设等方面的不足,是西北地区城市增强适应能力,降低干旱脆弱性亟待解决的关键问题。

根据以上研究结论,提出降低干旱脆弱性,提高城市适应干旱与水资源短缺环境的主要对策:

(1)强化规划引领和制度落实,提高城市用水管理能力。完善城市节水中长期规划,建立健全城市节水管理机构;实施非居民用水定额管理、阶梯水价,落实水效标识管理制度;结合景观补水和城市水生态修复,推动再生水等非常规水资源利用。

(2)加强水利设施建设,增强城市供水能力。对于资源性缺水严重的地区,政府应增加水利建设等专项资金投入,兴修水库,提高水资源储备能力,保障城市供水;农村地区可建立水窖,蓄存自然降水资源进行农田灌溉。

(3)改进节水技术,提高水资源利用效率。农业方面,通过政府补贴等形式,逐步推广喷灌、滴灌、

微灌和渗灌等节水灌溉技术,减少农业耗水量;工业企业方面,可通过优化企业布局、改善工艺流程、淘汰高耗水、高污染产能,引进先进节水技术与设备减少水耗,提高用水效益。

(4)加强节水教育,增强居民节水意识。利用世界水日、全国城市节约用水宣传周等广泛宣传,实施全民节水行动。

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] 杨飞,马超,方华军. 脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践[J/OL]. 生态学报,2019(2):1-12[2018-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20181018.1457.038.html>.
- [3] IPCC. Climate Change: The IPCC second assessment report [R]. Cambridge University Press,1996.
- [4] ADGER W N, KELLY P M. Vulnerability[J]. Global Environmental Change,2006,16(3):268-281.
- [5] CUTTER S L. Vulnerability to environmental hazards[J]. Progress in Human Geography,1996,20(4):529-539.
- [6] GILBERTO C, GALLOPÍN. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity[J]. Global Environmental Change,2006,16(3):293-303.
- [7] 黄晓军,黄馨,崔彩兰,等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1512-1525.
- [8] 黄晓军,王晨,胡凯丽. 快速空间扩张下西安市边缘区社会脆弱性多尺度评估[J]. 地理学报,2018,73(6):1002-1017.
- [9] 何艳冰. 城市边缘区社会脆弱性与失地农户适应性研究[D]. 西安:西北大学,2017.
- [10] ALNAIL M, LI Jianhua, JOSHUA E, et al. Assessing drought vulnerability and adaptation among farmers in Gadaref region, Eastern Sudan[J]. Land Use Policy,2018,70:402-413.
- [11] DUMITRAȘCU M, MOCANU I, MITRICĂ B, et al. The assessment of socio-economic vulnerability to drought in Southern Romania (Oltenia Plain) [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018,27:142-154.
- [12] ALI A, HAMID M. Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960-2100[J]. Science of The Total Environment, 2018,644:520-535.
- [13] 石育中,王俊,王子侨. 农户尺度的黄土高原乡村干旱脆弱性及适应机理[J]. 地理科学进展,2017,36(10):1281-1293.
- [14] 侯光良,肖景义,李生梅. 基于气候变化的干旱脆弱性评价——以青海东部为例[J]. 自然灾害学报,2012,21(2):163-168.
- [15] 王莺,王静,姚玉璧. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价[J]. 生态环境学报,2014,23(12):1897-1904.
- [16] 李梦娜,钱会,乔亮. 关中地区农业干旱脆弱性评价[J]. 资源科学,2016,38(1):166-174.
- [17] 曹永强,马静,李香云. 投影寻踪技术在大连市农业干旱脆弱性评价中的应用[J]. 资源科学,2011,33(6):1106-1110.
- [18] 石翠萍,杨新军,王子侨. 基于干旱脆弱性的农户系统体制转换及其影响机制——以榆中县中连川乡为例[J]. 人文地理,2015,30(6):77-82+39.
- [19] 石育中,李文龙,鲁大铭,等. 基于乡镇尺度的黄土高原干旱脆弱性时空演变分析——以榆中县为例[J]. 资源科学,2017,39(11):2130-2140.
- [20] 孙振蓉,陈斌,张学霞. 锡林郭勒盟农牧业干旱风险评价[J]. 自然灾害学报,2014,23(5):129-139.
- [21] 杨佩国,靳京,赵东升. 基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究——以北京市为例[J]. 地理科学,2016,36(5):733-741.
- [22] 安瓦尔·买买提明,戴锐. 新疆阿克苏地区城市自然灾害脆弱性评价研究[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1301-1307.
- [23] 孙洋,卢毅,熊先明. 四川省21市州城市自然灾害脆弱性评估研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(4):116-124.
- [24] 刘毅,黄建毅,马丽. 基于DEA模型的我国自然灾害区域脆弱性评价[J]. 地理研究,2010,29(7):1153-1162.
- [25] 张强,姚玉璧,李耀辉. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展,2015,30(2):196-213.
- [26] 徐涛,姚柳杨,乔丹. 节水灌溉技术社会生态效益评估——以石羊河下游民勤县为例[J]. 资源科学,2016,38(10):1925-1934.
- [27] 何艳冰,黄晓军,翟令鑫. 西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J]. 地理学报,2016,71(8):1315-1328.
- [28] 余亮亮,蔡银莺. 基于农户满意度的耕地保护经济补偿政策绩效评价及障碍因子诊断[J]. 自然资源学报,2015,30(7):1092-1103.
- [29] 何艳冰,黄晓军,杨新军. 快速城市化背景下城市边缘区失地农民适应性研究——以西安市为例[J]. 地理研究,2017,36(2):226-240.
- [30] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学,2010,22(2):151-160.