

石蜜蜜, 杨赛霓, 李双双, 等. 干旱胁迫下云南省县域居民用水脆弱性评价[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 215-219, 234. [SHI Mimi, YANG Saini, LI Shuangshuang, et al. Vulnerability Assessment of Domestic Water Under Drought Stress in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 215-219, 234. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.038.]

# 干旱胁迫下云南省县域居民用水脆弱性评价\*

石蜜蜜<sup>1,2</sup>, 杨赛霓<sup>1,2</sup>, 李双双<sup>3</sup>, 汪伟平<sup>1,2</sup>, 胡馥好<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西西安 710119)

**摘要:** 快速城市化及气候变化加剧了居民用水压力, 特别是在近年来干旱频发的云南。从脆弱性定义出发, 提出干旱胁迫下居民用水脆弱性评价框架, 并以此为基础建立指标体系, 实现了2000年及2010年云南省县域尺度干旱胁迫下居民用水脆弱性的定量描述, 结果发现: ①脆弱热点区集中于滇中城市群及滇西地区; ②县域尺度脆弱性趋平均化态势明显; ③不同地区脆弱性演变规律不同: 滇北及滇中大部分地区呈脆弱性增高态势, 与此同时, 滇西南及滇西北脆弱热点区面积缩小。

**关键词:** 脆弱性; 居民用水; 干旱; 干旱胁迫; 云南

**中图分类号:** X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0215-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.038

居民用水是指城市居民日常生活所需用水, 包括饮用、洗浴、冲厕、洗涤、烹调、清洁、庭院绿化、洗车以及漏失水等<sup>[1]</sup>。作为与人类生活息息相关的资源保障, 居民用水是人类生存的基本需求, 占城市生活用水一半以上<sup>[2]</sup>, 是保障居民用水安全的民生大计<sup>[3]</sup>。

近年来, 居民用水供需矛盾日益突出。一方面, 受水质污染、水资源浪费等影响, 居民用水供给难以维持; 另一方面, 伴随城市化进程的加快, 城市居民生活用水量递增。同时, 干旱胁迫加剧了居民用水供需矛盾, 已成为制约经济社会可持续发展的重要因素<sup>[4]</sup>, 尤其是在极端干旱事件发生频率递增的云南<sup>[5]</sup>。因此, 干旱胁迫下云南省社会系统中居民用水的供需矛盾亟待关注。

现有国内外相关研究多从城市居民用水量预测视角出发, 以历史数据为依托, 采用时间序列法、结构分析法和系统方法<sup>[6]</sup>, 其中, 线性回归和时间序列分析应用最为普遍。近年来, 神经网络、灰色预测、支持向量机等在生活用水预测中也得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。但伴随减灾实践的深入和灾害研究的发展, 单纯关注居民用水量已无法满足干旱灾害管理需要, 干旱灾害研究开始从致灾

因子论到脆弱性研究转移, 特定部门对灾害气候的脆弱性定量评估已成为气候变化研究的热点问题<sup>[9]</sup>, 在此背景下, 关注干旱胁迫下社会系统中居民用水的脆弱性高低具有更大实践指导意义。

## 1 概念框架

IPCC(2007)将脆弱性定义为: 某个系统易受到气候变化的不利影响, 包括气候变率和极端气候事件, 但却无能力应对不利影响的程度<sup>[10]</sup>。脆弱性随一个系统暴露下面临的气候变化和变异的特征、幅度和速率、敏感性及其适应能力而变化<sup>[11]</sup>。由此, 本文将干旱胁迫下居民用水脆弱性定义为: 居民用水易遭受干旱不利影响的程度。

1980年代以来, 灾害脆弱性研究取得了长足发展, 脆弱性评估为制定资源分配和适应性策略提供了实践指导<sup>[12]</sup>, 石勇等<sup>[13]</sup>将常用评估模式概括为: 风险-灾害(RH)模式、压力释放(PAR)模式、政治经济模式、基于区域的综合脆弱性模式和恢复力模式。其中, 指标体系构建法是定量刻画自然灾害脆弱性最普遍采用的方法。就干旱这一灾种而言, 脆弱性评估多出现于农业系统及生

\* 收稿日期: 2016-09-01 修改日期: 2016-10-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB955404); 北京师范大学地表过程模型与模拟创新研究群体科学基金(41321001); 国际减轻灾害风险合作研究中心(ICCR-DRR)

第一作者简介: 石蜜蜜(1992-), 女, 汉族, 山东济南人, 硕士研究生, 主要研究方向为灾后重建与脆弱性。

E-mail: 201421480056@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 杨赛霓(1975-), 女, 汉族, 江苏常州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通应急与风险管理。

E-mail: yangsaini@bnu.edu.cn

表1 云南干旱胁迫下居民用水脆弱性指标体系

一级指标	二级指标	权重	方向	参考文献编号
A <sub>1</sub> 致灾因子特征 (E)	B <sub>1</sub> 干旱强度	0.50	(+)	
	B <sub>2</sub> 干旱趋势	0.50	(+)	
A <sub>2</sub> 敏感性(S)	B <sub>3</sub> 家庭规模	0.10	(+)	[25-27]
	B <sub>4</sub> 5岁以下人口比重	0.10	(-)	[28-29]
	B <sub>5</sub> 65岁以上人口比重	0.10	(-)	[28-29]
	B <sub>6</sub> 女性人口比重	0.10	(+)	[27-29]
	B <sub>7</sub> 房屋有洗澡设施比重	0.10	(+)	[33]
	B <sub>8</sub> 房屋有自来水比重	0.10	(+)	[33, 35]
	B <sub>9</sub> 城镇人口比重	0.10	(+)	[30]
	B <sub>10</sub> 人均国民总收入	0.10	(+)	[36-37]
	B <sub>11</sub> 少数民族人口比重	0.10	(+)	[40]
	B <sub>12</sub> 租赁房屋人口比重	0.10	(+)	[41]
A <sub>3</sub> 应对能力(AC)	B <sub>13</sub> 人口失业率	0.33	(-)	[42]
	B <sub>14</sub> 平均受教育年限	0.33	(+)	[43]
	B <sub>15</sub> 从事社会福利行业人口比重	0.33	(+)	[44]

态系统<sup>[14-17]</sup>，社会经济系统涉猎较少<sup>[18]</sup>，特别是对居民用水的脆弱性鲜有关注。

由脆弱性定义可知，灾害脆弱性是一个由致灾因子特征、系统敏感性和适应能力三个一级指标组成的函数。借鉴谢盼(2015)高温热浪灾害脆弱性评价框架<sup>[19]</sup>，本文归纳出干旱胁迫下居民用水脆弱性评价框架(图1)，将干旱特征、社会系统敏感性和适应能力纳入评价概念框架，综合评价干旱对居民用水的潜在威胁。

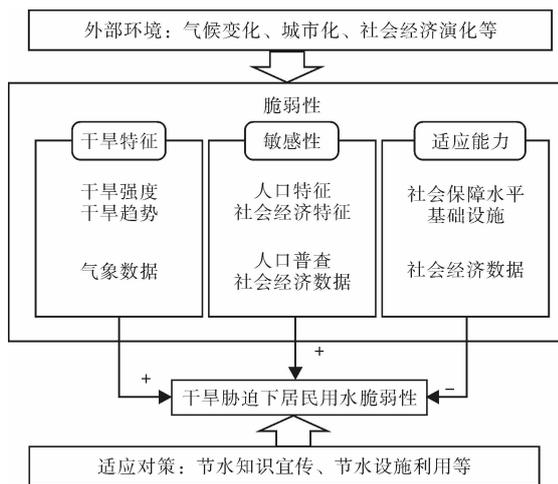


图1 干旱胁迫下生活用水脆弱性评价概念框架

详细来说，居民用水所在社会系统暴露下的致灾因子特征包含干旱强度和干旱趋势，由气象数据计算标准化降水蒸散指数(SPEI)获得；敏感性是系统受气候变率或气候变化影响的程度<sup>[11]</sup>，作为承灾体的固有属性表征载体能够承受的危害最大影响<sup>[20-21]</sup>，敏感性的表征需从人自身的生理状态及其所处的社会-经济-生态状态两个角度出发考虑，可分为人口特征和社会经济特征两方面，所需数据来源为人口普查数据及社会经济统计数据。适应能力是区域采取有效适应措施所需的能力、资源和机构的总和<sup>[11]</sup>，通常由反映社会保障水平及教育能力的指标反映。

## 2 指标体系

宏观尺度上，影响家户居民用水量的因素可总结归纳为：自然环境因素、社会经济因素和社会文化特征因素。与之相对应，反映干旱胁迫下居民用水脆弱性的指标可划分为以上三大类。

本文以干旱强度和干旱趋势表征居民用水所在社会系统暴露下的致灾因子特征。其中，2000与2010年干旱强度分别以1970-2000年、1980-2010年SPEI均值表征，2000与2010年干旱趋势分别以1970-2000年、1980-2010年SPEI斜率表征。

在敏感性指标选取上，人自身的生理状态如年龄、性别、疾病状况等都会影响其对于干旱灾害的敏感性<sup>[22-24]</sup>。

微观上，考量家庭结构对居民用水量的影响发现：家户规模与家庭月总用水量显著相关，且家户规模与生活用水量之间存在规模效应，表现为家庭人均用水量随家户规模增大降低的规律<sup>[25-27]</sup>。因此，本文将家庭规模作为反映敏感性的重要指标。居民生理因素差异也是影响家庭居民用水敏感性的重要指标，例如：生活用水量与居民年龄构成显著相关，具体表现为：儿童和老人用水量低于平均水平<sup>[28]</sup>，60岁以上老人拥有较好的节水习惯和较低的活动量，其用水量需求较低<sup>[29]</sup>。因此，本文利用5岁以下人口比重及65岁以上人口比重负方向表征敏感性。再如：性别对家庭总用水量有显著影响<sup>[30]</sup>，女性由于身体素质和社会角色等原因，日常生活用水量一般高于男性，且在干旱灾害适应中脆弱性高于男性<sup>[31-32]</sup>。此外，房屋洗澡设施比重和自来水比重直接影响居民用水量<sup>[33]</sup>。

宏观上，社会结构如城镇化水平对居民用水量的影响为：城市化水平越高，居民用水量越大<sup>[34]</sup>，此处本文以城镇人口比重指代城镇化水平。以家户数据为依托，Nieswiadomy等、Rizaiza得到的居民用水收入弹性均为正<sup>[36-37]</sup>，即：该区域人均收入

越高, 用水量越大。从区域整体出发, 世界银行得到了相似的结论<sup>[38]</sup>。因此, 本文将人均国民总收入作为敏感性指标之一。一般而言, 少数民族自治区多居住于偏远山区, 对自然资源(如水资源)高度依赖<sup>[39]</sup>, 云南作为少数民族集中分布省份(2010年少数民族人口比重为 33.4%), 需将少数民族比重纳入生活用水脆弱性评价的重要指标之一<sup>[40]</sup>。最后, 我们选取租赁房屋人口比重, 反映现有流动人口对脆弱性的影响<sup>[41]</sup>。

在适应能力指标选取上, 考虑到失业率可在一定程度上反映社会的稳定性, 当失业率越高时, 居民在应对灾害时适应能力相对较低<sup>[42]</sup>。受教育程度影响人对干旱的适应能力, 一方面, 受教育水平高的人群一般具有较强的节水认知, 会主动采取节约用水的措施<sup>[43]</sup>; 另一方面, 此类人群倾向于且有能力支付节水型生活器具。从宏观社会保障角度来看, 社会保障、应急管理社会福利保障业的发展有利于提高灾害应对能力, 从而降低整体社会脆弱性<sup>[44]</sup>。

由此, 选取了针对居民用水的 15 个指标构建干旱胁迫下云南县域生活用水脆弱性评价体系, 具体指标如表 1 所示。

本文沿用 Cutter 对美国县域尺度社会脆弱性指标计算中等权重做法<sup>[22]</sup>, 将相同一级指标下的二级指标视为同等重要。

### 3 干旱胁迫下居民用水脆弱性指数 (Domestic Water Vulnerability Index, DWVI)

广义的灾害脆弱性是一个由承灾体暴露下致灾因子特征  $E$ 、易感性  $S$  和应对能力  $AC$  三个一级指标组成的函数, 但当前不同学者对该函数具体形式表达有不同看法, Jeanne 等<sup>[45]</sup>对灾害脆弱性函数的表达进行了系统梳理, 如表 2 所示。

本文首先采用最常见的  $M_2$  模型计算干旱胁迫下生活用水脆弱性指数, 具体表达如下:

$$DWVI_i = \sum_j E_{ij} \omega_1 + \sum_k S_{ik} \omega_2 - \sum_p AC_{ip} \omega_3, \omega_1 =$$

$$0.50, \omega_2 = 0.10, \omega_3 = 0.33, i = 1, 2 \dots 125, j = 1, 2, k = 1, 2 \dots 10, p = 1, 2, 3. \quad (1)$$

表 2 灾害脆弱性函数表达方式

模型	公式	参考文献编号
$M_1$	$V = E + S + AC$	[46 - 47]
$M_2$	$V = E + S - AC$	[48 - 50]
$M_3$	$V = E \times S \times AC$	[51]
$M_4$	$V = E \times S \div AC$	[49, 52]
$M_5$	$V = (E - AC) \times S$	[53]

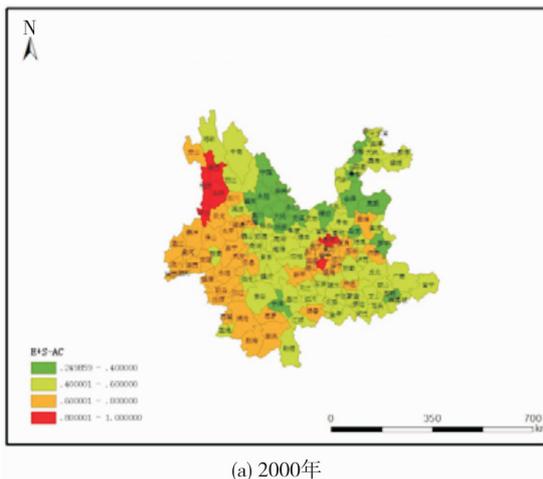
式中:  $DWVI_i$  为第  $i$  县干旱胁迫下生活用水脆弱性指数,  $E_{ij}$  为第  $i$  县第  $j$  个暴露性指标,  $S_{ik}$  为第  $i$  县第  $k$  个敏感性指标值,  $AC_{ip}$  为第  $i$  县第  $p$  个应对能力指标值,  $\omega_1$  为致灾因子强度指标权重(此处视为等权重 0.50),  $\omega_2$  为各敏感性指标权重(此处视为等权重 0.10),  $\omega_3$  为各应对能力指标权重(此处视为等权重 0.33)。共计 125 个县, 致灾因子特征指标共计 2 个, 敏感性指标共计 10 个, 应对能力指标共计 3 个。最终所得  $DWVI_i$  分布如图 2 所示。

对比图 2a 与图 2b, 云南省 2010 年  $DWVI_i$  均值为 0.56, 较 2000 年(0.55)略有下降, 且两个时间节点  $DWVI_i$  空间分布表现出较高的一致性, 高脆弱热点区均位于滇中城市群及滇西地区。不同的是, 从 2000 - 2010 年, 滇西南及滇西北脆弱热点区面积呈缩小状态; 与此同时, 滇中大面积区域(如楚雄等)由中脆弱向高脆弱区演变, 滇北地区(如永胜县等)呈脆弱性增高态势, 特别地, 华坪县在两个时间节点间呈现出低脆弱性向极高脆弱性的显著变化。

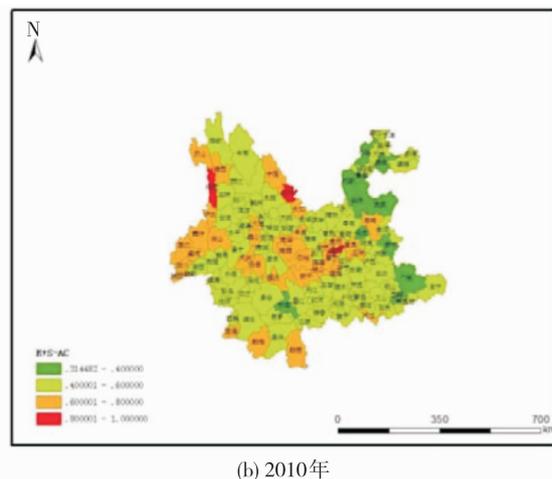
为进一步对比两个时间节点  $DWVI_i$  的演变, 特将脆弱性分为低、中、高和极高四个等级, 并进行区县个数统计, 如表 3 所示。

表 3 云南省脆弱性等级区县统计

脆弱性等级	2000 年	2010 年
低脆弱性(0.2, 0.4]	18	11
中脆弱性(0.4, 0.6]	57	75
高脆弱性(0.6 - 0.8]	44	36
超高脆弱性[0.80, 1)	6	3
方差	0.14	0.11



(a) 2000年



(b) 2010年

图 2 2000 年与 2010 年云南省县域  $DWVI$  分布( $M_2$ )

2010年云南省全省县域尺度  $DWVI_i$  方差较2000年有所下降(表3),具体表现为:低脆弱区、高脆弱区及极高脆弱区个数减少,中脆弱区个数增幅较大,即脆弱性趋平均化态势明显。

为明确原因,特将三个一级指标进行了对比统计分析,如表4所示。分析表4可得,伴随教育普及和社会福利行业的发展,2010年较2000年应对能力略有上升,城市化水平的提高和社会经济的迅速发展大大提高了易感性,与此同时,云南省总体干旱致灾因子强度加强(2000年  $SPEI$  均值为0.03,2010年  $SPEI$  均值为-0.27),但统计时段内总体致灾因子趋势呈下降态,由此所得致灾因子特征  $E$  值降低。因此,计算所得的  $DWVI_i$  方差降低。

表4 2000年与2010年一级指标对比统计分析

	均值		方差	
	2000年	2010年	2000年	2010年
致灾因子特征( $E$ )	0.57	0.50	0.13	0.10
易感性( $S$ )	0.13	0.20	0.09	0.08
应对能力( $AC$ )	0.13	0.15	0.06	0.07

同时,考虑到不同计算公式间的不确定性,我们又采用  $M_4$ 、 $M_5$  进行脆弱性指数计算,结果如图3和图4所示。脆弱性空间差异及时间演变与图2a、图2b呈现一致性,脆弱性热点区也具有高度一致性。

### 4 结论

城市化进程的加速及干旱胁迫加剧了人类社会系统的居民用水压力,特别是在近年来干旱频发的云南,当前,定量评估区域和部门对灾害气候的脆弱性已成为气候变化研究的热点问题。基于脆弱性定义,本文归纳出干旱胁迫下居民用水脆弱性评价框架,以此为基础建立指标体系,实现了云南省县域尺度干旱胁迫下居民用水脆弱性的定量评价,分析了  $DWVI$  的时空格局特征,在理论上弥补了干旱脆弱性评估中对居民用水的关注不足,也为区域灾害管理,特别是脆弱热点区的灾害监管提供了重要实践指导。

单就2000年与2010年两个时间点分析可见,云南省县域干旱胁迫下居民用水脆弱性呈现特定空间格局:滇中城市群及滇西地区因其气候敏感而成为脆弱热点区。

通过对2000年到2010年间纵向对比可以发现,  $DWVI$  的空间分布呈现明显的时空演变规律:①县域尺度脆弱性趋平均化态势明显,具体表现为:低脆弱区、高脆弱区及极高脆弱区个数减少,中脆弱区个数增幅较大;②滇北地区(如永胜县等)呈脆弱性增高态势,滇中大部分区域也表现为中脆弱向高脆弱的转变,与此同时,滇西南及滇西北脆弱热点区面积呈缩小状态。

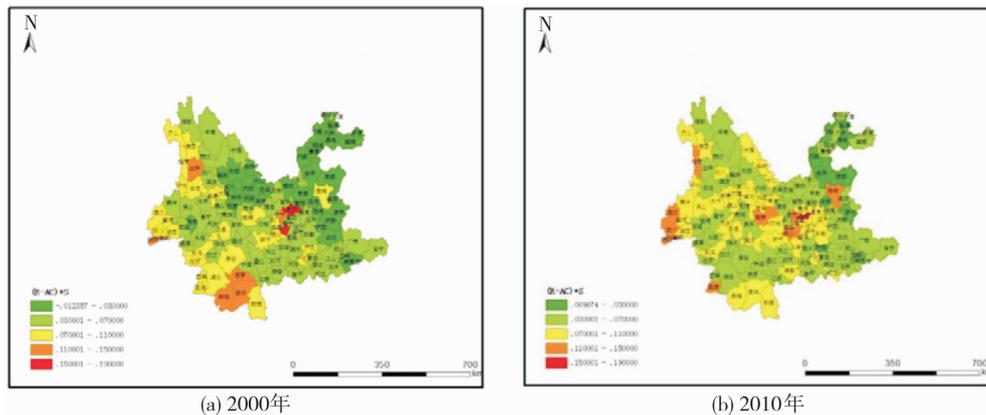


图3 2000年与2010年云南省县域  $DWVI$  分布( $M_4$ )

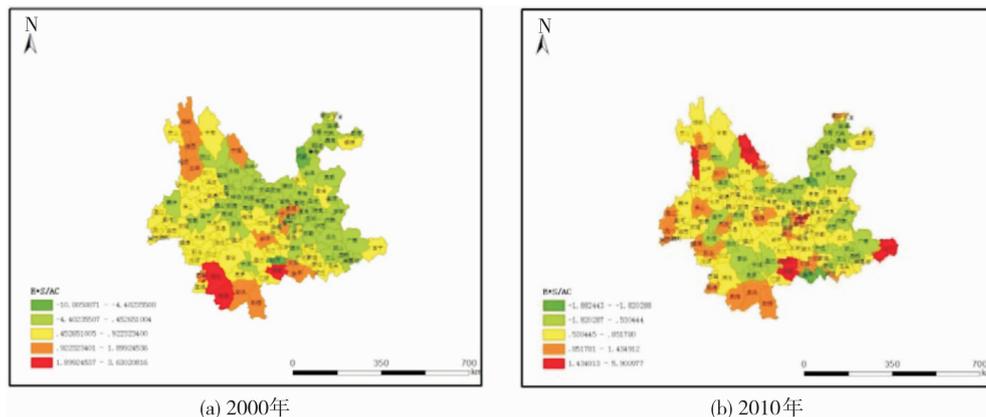


图4 2000年与2010年云南省县域  $DWVI$  分布( $M_5$ )

未来干旱灾害风险管理中, 亟待将脆弱热点区列入重点监察对象, 一方面通过改善教育状况、完善社会福利、社会保障等提高其应对能力以降低区域灾害脆弱性; 同时, 需做好高脆弱区的居民用水规划、节水技术推广、节水宣传教育等, 减缓区域居民用水压力。

## 参考文献:

- [1] 侯俊, 王超, 吉栋梁. 我国饮用水水源水质标准的现状及建议[J]. 中国给水排水, 2007, 23(20): 103-106.
- [2] Kindler and Russell. Modeling Regional Water Demand [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [3] 王小军, 张建云, 贺瑞敏, 等. 干旱区用水结构变化及趋势探讨——以陕西省榆林市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 76-81.
- [4] 杜建丽, 林振山, 张真真. 基于EMD的我国受旱面积波动的多时间尺度的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(5): 90-93.
- [5] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190.
- [6] 张雅君, 刘全胜. 需水量预测方法的评析与择优[J]. 中国给水排水, 2001, 17(7): 27-29.
- [7] Skhan M. and Coulibaly P. Application of support vector machine in lake water level prediction[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(3): 199-205.
- [8] 李栋, 王洪礼, 杜忠晓, 等. 城市生活用水量的支持向量回归预测[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2006, 8(1): 64-67.
- [9] 杨婷婷, 吴新宏, 李鹏, 等. 中国北方草原区县城气候变化脆弱性评价指标体系构建和分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 113-116.
- [10] Climate Change 2001: Contribution of working groups I, II and III to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001.
- [11] Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of the working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [12] Preston B L, Westaway R M, Yuen E J. Climate adaptation planning in practice: An evaluation of adaptation plans from three developed nations[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2011, 16(4): 407-438.
- [13] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 自然灾害脆弱性研究进展[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 131-137.
- [14] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 等. 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.
- [15] 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.
- [16] 胡颖颖, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 新疆2001-2010年农业气候干旱脆弱性分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 254-259.
- [17] 倪深海, 顾顺, 王会容. 中国农业干旱脆弱性分区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 705-709.
- [18] 喻忠磊, 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.
- [19] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价——研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 165-174.
- [20] Turner B L, Kasperson, R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [21] Fussler H M. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research[J]. Global Environmental Change, 2007, 17(2): 155-167.
- [22] Cutter S L, Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.
- [23] Reid C E, Mann J K, Alfasso R, et al. Evaluation of a heat vulnerability index on abnormally hot days: an environmental public health tracking study[J]. Environmental health perspectives, 2012, 120(5): 715.
- [24] Johnson D P, Stanforth A, Lulla V, et al. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data[J]. Applied Geography, 2012, 35(1): 23-31.
- [25] Arbués F, Barberún R, Villanúa I. Price impact on urban residential water demand: a dynamic panel data approach[J]. Water Resources Research, 2004, 40(11): 151-175.
- [26] Höglund L. Household demand for water in Sweden with implications of a potential tax on water use[J]. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3853-3863.
- [27] Arbués F, García-Valiñas M Á, Martínez-Españeira R. Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review[J]. The Journal of Socio-Economics, 2003, 32(1): 81-102.
- [28] Organization for Economic Cooperation and Development. Household energy & water consumption and waste generation[R]. Paris: OECD, 2001.
- [29] Nauges C, Thomas A. Privately operated water utilities, municipal price negotiation, and estimation of residential water demand: the case of France[J]. Land Economics, 2000, 76(76): 68-85.
- [30] 赵卫华. 居民家庭用水量影响因素的实证分析——基于北京市居民用水行为的调查数据考察[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 137-142.
- [31] Morrow B Hand B Phillips. What's Gender 'Got to Do With It'? [J]. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 1999, 17(1): 5-11.
- [32] Cutter S L. Vulnerability to environmental hazards[J]. Progress in Human Geography, 1996, 20(4): 529-39.
- [33] 石红旺, 赵勇, 屈吉鸿, 等. 天津市城市居民用水行为调查及影响因素识别[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 143-147.
- [34] 李雪铭, 张丹. 城市化与我国北方城市居民用水关系的定量研究——以大连市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 18-22.
- [35] 徐辉. 北京市城市居民生活用水影响因素跟踪调查分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [36] Nieswiadomy M L, Molina D J. Comparing residential water demand estimates under decreasing and increasing block rates using household data[J]. Land Economics, 1989, 65(3): 280-289.
- [37] Abu Rizaiza O S. Residential water usage: a case study of the major cities of the western region of Saudi Arabia[J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 667-671.
- [38] Banco Mundial. Plans for development of rural water supply and sanitation in Anambra State [J]. Bulletin Des Sociétés D'ophtalmologie De France, 1989, 84(5): 5-11.
- [39] 陈云霞. 环保法视野下的少数民族生态文化建设——以四川民族自治地方为例[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2012, 33(11): 103-108.
- [40] Bolin R, Stanford L. Shelter, housing and recovery: a comparison of US disasters[J]. Disasters, 1991, 15(1): 24-34.
- [41] Heinz Center. The Hidden Costs of Coastal Hazards: Implications for Risk Assessment and Mitigation [M]. Washington, D. C.: Island Press, 2000.
- [42] Mileti D. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States [M]. Joseph Henry Press, 1999.
- [43] 郝泽嘉, 王莹, 陈远生, 等. 节水知识, 意识和行为的现状评估及系统分析——以北京市中学生为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1618-1628.
- [44] 钟凤元, 张积储. 气候风险视域下我国应对气候变化之法律进路[J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2014, 7(5): 454-460.
- [45] Luh J, Christenson E C, Toregozhina A, et al. Vulnerability assessment for loss of access to drinking water due to extreme weather events[J]. Climatic Change, 2015, 133(4): 665-679.
- [46] Borden K A, Schmidlein M C, Emrich C T, et al. Vulnerability of US cities to environmental hazards[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2007, 4(2): 1-21.
- [47] Corobov R, Strodoev I, Koeppl S, et al. Assessment of climate change vulnerability at the local level: a case study on the Dniester River Basin (Moldova)[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(5): 1393-1399.
- [48] Antwi-Agyei P, Fraser E D G, Dougill A J, et al. Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data[J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 324-334.
- [49] Cinner J E, McClanahan T R, Graham N A J, et al. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries[J]. Global Environmental Change, 2012, 22(1): 12-20.

[33] 鲍新中, 张建斌, 刘澄. 基于粗糙集条件信息熵的权重确定方法[J]. 中国管理科学, 2009, 17(3): 131-135.

[34] 杨鹏, 刘品杰, 张燕, 等. 基于 RBF 神经网络的改进多变量预测控制[J]. 控制工程, 2009, 16(1): 39-41, 55.

## Mountain Torrent Disaster Loss Prediction Research Based on RSs and RBF Neural Network: A Case Study on Shennongjia

LI Yichen, HE Yabo and WANG Yang

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Shennongjia, located in the central and western mountainous areas, suffered serious damage from mountain torrent in recent years. The mountain torrent threatens the communities usually, which pushes the people in worse condition. In this paper, on the basis of disaster system theory, mountain torrent disaster loss indicator system is established in the varied topography and poor people wide distribution mountainous area. The indicator system divided into 4 main components, namely disaster-inducing factors, hazard inducing environment, physical exposure, and disaster relief capacity. To optimizing the indicator system, rough set theory is employed to analyze and optimize the input indicators. Applying the RBF neural network model based on the mountain torrent disaster hazard, property damage and casualties were computed in Shennongjia. The results indicated that: Rough sets theory can effectively extract the predictors that closely related to mountain torrent disaster and observably improves prediction accuracy; The RBF neural network model based on the rough sets theory has higher prediction accuracy compared with the general RBF neural network, of which the relative error generally maintained at about 3% and the relative error curve is more gentle.

**Key words:** mountain torrent disasters; loss forecasting; rough sets; RBF Neural Network

(上接第 219 页)

[50] Silva B K N, Lucio P S. Indicator of agriculture vulnerability to climatic extremes: A conceptual model with case study for the North-east Brazil[J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2014, 4(2): 334-345.

[51] Ferrier N, Haque C E. Hazards risk assessment methodology for emergency managers: A standardized framework for application[J]. Natural Hazards, 2003, 28(2-3): 271-290.

[52] Balica S F, Douben N, Wright N G. Flood vulnerability indices at varying spatial scales[J]. Water science and technology, 2009, 60(10): 2571-2580.

[53] Hahn M B, Riederer A M, Foster S O. The Livelihood Vulnerability Index: A pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change—A case study in Mozambique[J]. Global Environmental Change, 2009, 19(1): 74-88.

## Vulnerability Assessment of Domestic Water under Drought Stress in Yunnan

SHI Mimi<sup>1,2</sup>, YANG Saini<sup>1,2</sup>, LI Shuangshuang<sup>3</sup>, WANG Weiping<sup>1,2</sup> and HU Fuyu<sup>1,2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Tourism and Environment, Shanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Pressure of domestic water is aggravated by rapid urbanization and climate change, especially in Yunnan Province, where is prone to drought hazard. Based on the definition of vulnerability, this paper proposed a conceptual framework for vulnerability assessment of domestic water under drought stress and established an index system, in order to quantitatively describe the vulnerability in 2000 and 2010. The results show that, 1) the most vulnerable regions are mostly located in central and western Yunnan; 2) DWVI in 2010 becomes more equal; 3) evolution patterns differ in different regions, that is, northern and central Yunnan show more vulnerable, while vulnerable regions in southwestern and northwestern Yunnan shrink. The suggestions put forward for further hazard governance are, to enhance supervision of vulnerable hot zones and to improve the adaptive capacity (e. g. make better domestic water plan etc.).

**Key words:** vulnerability; domestic water; drought; Yunnan