

# 半干旱区社会—生态系统干旱恢复力的量化研究

王俊<sup>1,2</sup>, 杨新军<sup>1</sup>, 刘文兆<sup>2</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:** 频繁发生的旱灾已成为限制中国西北半干旱区农业发展和生态环境建设的主要扰动因子。社会-生态系统恢复力理论可以加深人们对干旱环境中的社会学与生态学交互过程与机理的理解, 提高当地系统抵御旱灾的能力。社会—生态系统恢复力是指系统能够承受且可以保持系统的结构、功能、特性以及对结构、功能的反馈在本质上不发生改变的干扰大小。目前, 恢复力的研究大多停留于定性的、概念上的描述, 缺乏对恢复力可操作性的实证案例研究模式。本文以甘肃省榆中县为例, 从社会、经济和生态3个角度选择水分敏感因子, 构建社会—生态系统, 建立了恢复力测定的定量模型, 计算了过去15年来榆中县社会—生态系统对干旱的恢复力变化, 并分析了影响恢复力变化的因素。

**关键词:** 社会—生态系统; 恢复力; 干旱; 榆中县

## 1 引言

气候变化是全球变化研究的一个重要领域。在中国西北地区, 频繁发生的干旱是最主要的气候干扰因子之一, 也是当地农业发展和生态环境建设最主要的限制因素。如何应对气候变化及其不确定性, 提高干旱恢复力和适应力, 是当前研究的主要目标之一<sup>[1]</sup>。以往的研究多侧重于干旱(旱灾)的自然成因<sup>[2-3]</sup>, 对干旱胁迫下的社会学过程重视不够, 而这方面的工作对灾害风险管理、灾害救助、减灾政策制定具有更为重要的指导作用。尽管近年来已有学者开始关注人为因素在旱灾形成过程中的影响<sup>[4-5]</sup>, 但尚缺乏合理的理论框架来实现学科交叉与知识整合。如何通过深入了解干旱环境中的社会学与生态学的交互作用过程与机理来建立对干旱的适应对策? 近年来国外逐渐形成的“社会—生态系统恢复力”整合理论为此提供一个可供参考研究的框架<sup>[6-8]</sup>。

社会系统和自然系统相互依赖, 也都是动态的和复杂的, 二者紧密相连共同构成了一个复杂适应的社会—生态系统<sup>[6-7]</sup>, 它具有非线性相关、阈值效应、历史依赖和多种可能结果等特征, 并在时间序列上依次经过开发、保护、释放和重组4个不同阶

段构成一个适应性循环<sup>[7]</sup>。Walker等<sup>[8]</sup>提出外部干扰下的社会—生态系统演化轨迹可以由恢复力(系统能够承受的并且可以保持系统的结构、功能、特性以及对功能、结构的反馈在本质上不发生改变的变化的数量)、适应力(系统参与者影响恢复力的能力)和转化力(当生态、经济或社会结构使现存系统难以维持时创造一个全新系统的能力)3个属性决定, 其中对恢复力进行量化研究是深入了解社会—生态系统其他两个属性的基础。当社会—生态系统在适应性循环的4个阶段中运行时, 特别是保护阶段时, 某些外部的干扰会使系统发生重大转变。所以当面对外部干扰(如气候变化)时, 如何维持系统稳定性, 防止其进入非预期的状态, 同时保护并培育系统的学习和自组织能力, 都需要以恢复力的大小作为依据<sup>[7-9]</sup>。因此, 如何定量测定恢复力并将之应用于具体的案例研究已成为社会—生态系统研究的首要任务<sup>[10-11]</sup>, 但迄今尚缺乏有关社会—生态系统恢复力测算的实例<sup>[12]</sup>。

本文以半干旱环境下的社会—生态系统为对象, 以干旱作为系统扰动因子, 构建了社会—生态系统对干旱恢复力的简单概念性模型, 并以甘肃省榆中县为例进行了实证研究, 旨在探讨可操作性较强的社会生态系统恢复力量化研究模式, 明晰半

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(30500077); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(kzcx2-yw-424-1); 陕西省自然科学基金项目(2006D02)。

作者简介: 王俊(1974-), 男, 河南虞城人, 副教授, 博士, 主要从事社会—生态系统整合分析和农田生态系统管理研究。

E-mail: wangj@nwu.edu.cn

干旱地区社会—生态系统对干旱的适应演化动态及其中的社会学和生态学过程的交互作用机制。

## 2 恢复力的定量化计算模型

在社会—生态系统研究中,恢复力与脆弱性被认为是同一事物的两面(恢复力高,脆弱性就低,反之亦然)<sup>[7-8, 10-11]</sup>。Zurnili等<sup>[13]</sup>提出在任意特定时空尺度上,社会—生态系统的脆弱性同时取决于系统的敏感性和自然、人类导致的压力,这种关系可以用一个简单的概念性模型来表示:

$$F=K+a(U) \quad (1)$$

式中: $F$ 为特定时空尺度上的系统脆弱性; $a$ 为系统内的敏感性因子; $U$ 为外部压力; $K$ 为常数,代表了当外部压力 $U=0$ 时系统的背景脆弱性。由于恢复力与脆弱度的一体两面性,因此可以使用下述公式进行系统恢复力的测定:

$$R=1/(U \times \sum a) \quad (2)$$

式中: $R$ 为社会—生态系统的恢复力;其他参数的含义不变。

作为一个随机事件,干旱缺水是黄土高原地区社会—生态系统最主要的外部干扰因素,直接影响到生态系统生产力并间接对经济系统的效益和社会—系统的稳定性产生影响。因此,特定时空尺度上社会—生态系统对干旱的恢复力大小取决于系统内部(社会、经济、生态诸要素)对干旱的敏感程度和干旱胁迫压力,并与之呈负相关。系统对干旱的敏感程度可通过构建系统水分敏感因子体系来加以表示,而干旱胁迫压力与降水、气温、径流等多种气象要素有关,可采用修正的Selianinov干燥度指数<sup>[14]</sup>进行表述,计算方法如下:

$$U=0.16 \times \sum (T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}/P_{\geq 10^{\circ}\text{C}}) \quad (3)$$

式中: $T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ 为日平均气温稳定通过 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的累积温度; $P_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ 为日平均气温稳定通过 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的总降水量。

综上所述,在干旱环境中社会生态系统对干旱的恢复力测定可用下述公式进行测定:

$$R=1/(U \times \sum (a_i \times w_i)) \quad (i=1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

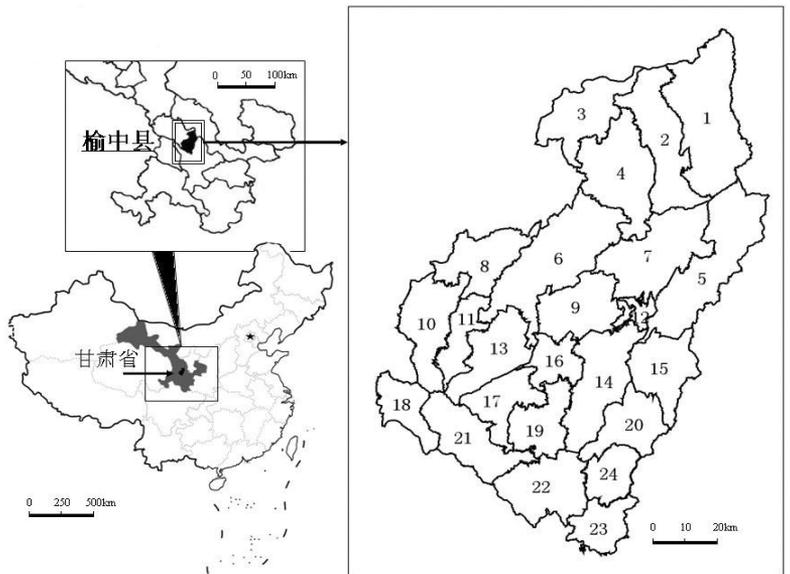
式中: $R$ 为系统恢复力; $U$ 为系统承受的干

旱胁迫压力,用干燥指数(式3)表示; $a_i$ 为系统内部水分敏感因子特征值; $w_i$ 为该水分敏感因子所占权重。通过对该模型的计算可以模拟系统对外部干扰的恢复力的表述,为特定干扰(干旱)下社会—生态系统的适应演化机制提供了定量化的研究思路。

## 3 案例研究

### 3.1 研究区概况

榆中县位于 $103^{\circ}50' \sim 104^{\circ}34' \text{ E}$ ,  $35^{\circ}34' \sim 36^{\circ}26' \text{ N}$ (图1),海拔1430~3670 m,面积3301.6 km<sup>2</sup>,年均气温6.9℃,年均降雨量350 mm,日照时数2665.9 h。全县共辖8镇15乡,人口42.1万人,其中农业人口38.6万人(2005年数据)。区内地形地势复杂、海拔高差大,由生态与社会经济条件迥异的3个区域组成:南部山区、北部山区两大贫困带和中部的川区。南部为石质高寒山区,森林草地植被良好,气候湿润,农作物以小麦、豆类为主;中部为川塬沟壑地带,光照充足,水源丰富,属灌溉农业区,农作物以小麦、玉米、蔬菜为主,兼种洋芋、油料等;北部山区,干旱少雨,沟壑纵横,植被稀少,农作物以小麦、豆类、洋芋为主,是退耕还草养畜的重点地区。受自然、社会、经济等条件的制约,当地(尤其



1. 园子岔 2. 上花岔 3. 青城 4. 哈岷 5. 中连川 6. 金崖 7. 贡井 8. 来紫堡 9. 夏官营
10. 和平 11. 定远 12. 鲁家沟 13. 连搭 14. 甘草店 15. 韦营 16. 三角城 17. 城关
18. 银山 19. 小康营 20. 清水驿 21. 马坡 22. 新营 23. 龙泉 24. 高崖

图1 榆中县地理位置示意图

Fig.1 Location of Yuzhong County, China

是南部和北部山区)农民谋生手段单一,绝大多数从事农业劳动,经济可替代性差。干旱作为当地社会—生态系统稳定性的主要干扰因子,符合上述模型的应用目的。1991—2005年各年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间累积温度和降水如图2所示。

### 3.2 社会—生态系统构建

一个系统的行为往往是由一个或几个关键变量决定的<sup>[15]</sup>。如何了解系统内部各亚系统的行为并将它们有机地整合在社会—生态系统的框架内,需找到联系各个亚系统的关键变量。作为随机事件,干旱是研究区内社会—生态系统最主要的外部干扰因素,直接影响到生态系统生产力并间接对经济系统的效益和社会系统的稳定性产生影响。因此,将水分敏感与否及其程度作为联结关键变量选择的主要依据。在选择评价指标和权重时,主要征求对区域状况较为熟悉的资深专家,通过其对多个指标的筛选获取一套构建系统对干旱恢复力的指标,同时结合实际指标获取容易度来进行二次筛选,构建一套水分敏感因子指标体系即可用来表征干旱环境下的社会—生态系统(表1)。然后对构建水分敏感因子指标进行专家打分,打分原则分为重要(9分)、较重要(7分)、一般(5分)、较不重要(3分)、不重要(1分)等5个等级;并运用层次分析法确定各因子的权重,其结果如表1所示。所选指标根据其水分敏感度的影响关系分为正向指标(+)和负向指标(-),正向指标表明该指标数值的增加有助于提高系统水分敏感程度,负向指标则相反。

### 3.3 资料获取及数据处理

系统承受的外部压力计算所需的降水和气温资料(1991—2005年)由甘肃省气象局和榆中气象局提供。表1中所列指标中,粮食单产、林草覆盖率、农民年均纯收入、有效灌溉系数、人口数量等指标数据由榆中县农业局和统计局提供;人均粮食产量指标数据采用粮食总产量与人口数量的比值进行计算;知识程度指标采用初中以上文化程度人数占总人口的百分比进行计算;劳动力密度指标数据采用劳动力数量占总人口的百分比进行计算,计算所需的基础数据均由县统计局提供。数据收集后,进行归一化处理,获得各个指标的特征值( $a_i$ ),最后参照上述公式(4)计算系统恢复力。

表1 榆中县社会—生态系统构成  
Tab.1 Components of the social-ecological system in Yuzhong County

系统层	亚系统	指标	与水分敏感度关系	权重
	生态亚系统	粮食单产	-	0.1115
		林草覆盖率	-	0.1485
社会—生态系统	经济亚系统	农民年均纯收入	-	0.0832
		人均粮食产量	-	0.1119
		农业收入比例	+	0.1264
		有效灌溉系数	-	0.1318
	社会亚系统	人口数量	+	0.1130
		知识程度	-	0.0802
		劳动力密度	-	0.0925

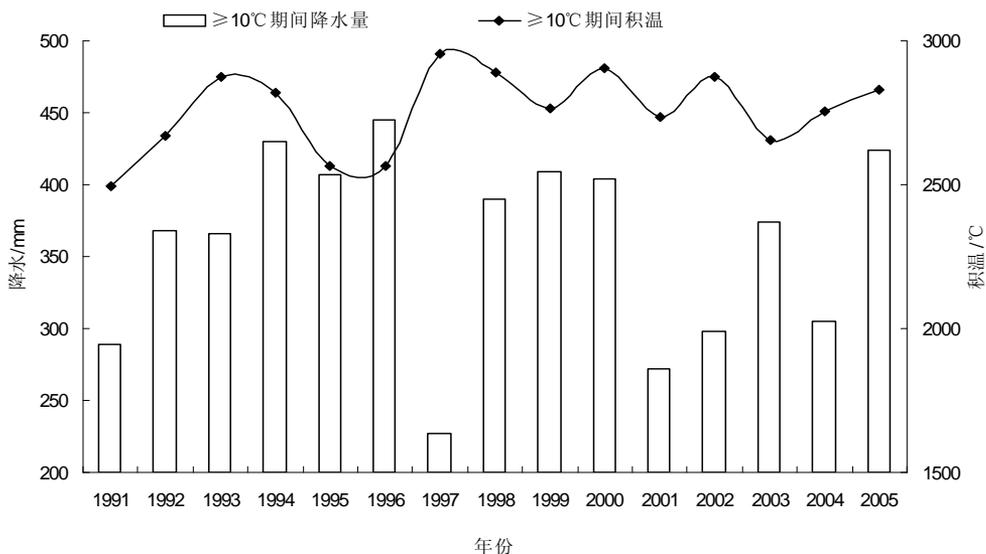


图2 1991—2005年榆中县降水和气温变化

Fig.2 Precipitation and temperature changes in Yuzhong County during 1991-2005

### 3.4 结果分析

#### 3.4.1 干旱压力

图3显示1991—2005年期间,榆中县社会—生态生态系统承受的干旱压力在不同年份间波动较大。其中在1991—1996年期间表现出短期的减弱趋势( $P<0.05$ ),以后则无趋势性变化。本文以修正的Selianinov干燥度指数来表征系统承受的干旱压力大小,其值不仅与日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 连续累积积温有关,还与同期降水总量有关。榆中县地处黄土高原半干旱地区,降水不足直接影响到农业生产和农民生活,导致粮食减产。与气温变化相比,该区年均降水高波动特征对当地社会—生态系统扰动更大。尤其是在降水严重不足的1997年,系统承受干旱压力显著高于其他年。

#### 3.4.2 水分敏感度

图4显示从1991—2005年榆中县社会—生态系统对干旱的敏感程度总体呈极显著增高趋势( $P<0.01$ )。值得注意的是,系统水分敏感度在2001年达到最高值后呈缓慢下降趋势,但其平均值仍高于2000年以前的平均水平。

#### 3.4.3 恢复力

1991—2005年,榆中县社会—生态系统对干旱的恢复力呈逐渐下降趋势(图5,  $P<0.05$ ),但不同年份间具有较大的波动性,1995年系统恢复力值最高,主要原因在于水分敏感度的下降。1997年恢复力值最低,主要与当年降水不足、干旱压力过大有关系。2001年是系统恢复力变化拐点,后面5年恢复力呈显著增高趋势。

#### 3.4.4 恢复力的影响因素分析

社会—生态系统对干旱的恢复力不仅受到来自外部的干旱压力,也来自于系统内部的水分敏感程度。干旱压力主要受到降水和气温等气象因子影响,系统水分敏

感程度则可能来自于社会、经济和生态各个亚系统。图6显示了不同年份系统内部各个亚系统水分敏感指标对系统敏感度的贡献率。

在3个亚系统中,经济亚系统4个指标16年平均对整个系统水分敏感度的贡献达到了55.3%,其

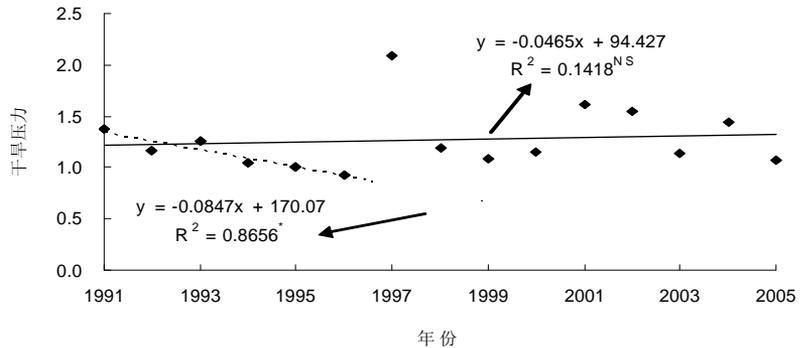


图3 榆中县社会—生态系统承受的干旱压力变化

Fig.3 Drought stress on Yuzhong social-ecological system

注:\*表示 $P<0.05$ ;NS表示不显著。

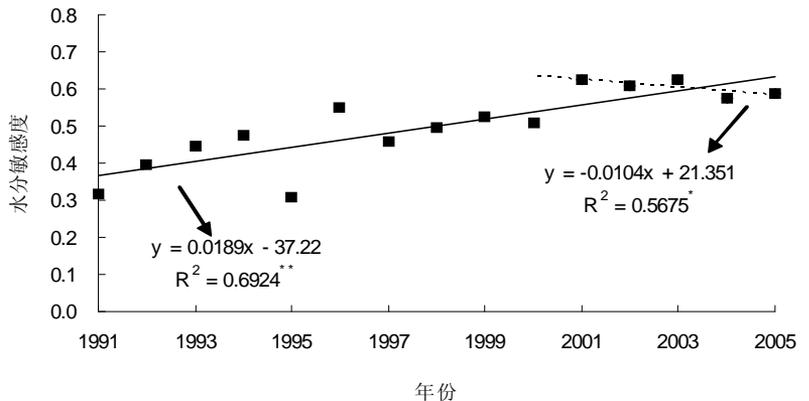


图4 榆中县社会—生态系统水分敏感度变化

Fig.4 Water sensitivity of Yuzhong social-ecological system

注:\*表示 $P<0.05$ \*\*表示 $P<0.01$ 。

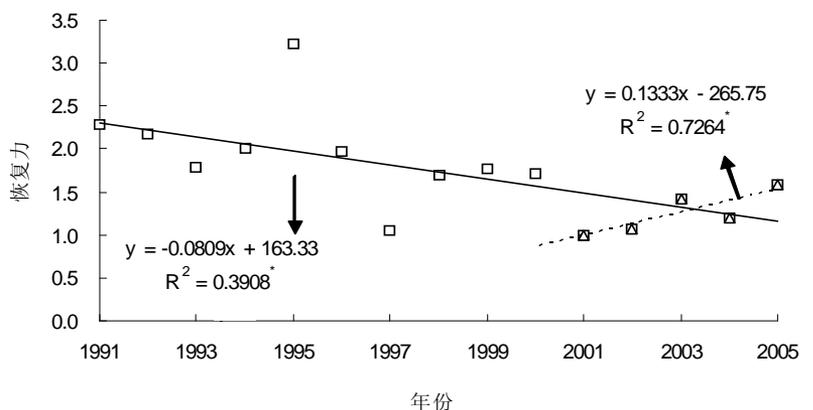


图5 榆中县社会—生态系统对干旱的恢复力变化

Fig.5 Resilience of Yuzhong social-ecological system to drought

注:\*表示 $P<0.05$ 。

次为生态亚系统占25.0%,社会亚系统对干旱缺水的敏感性较低,仅占19.7%。这表明,面对干旱扰动,当地社会—生态系统的经济状况是决定其恢复力的关键因素。值得注意的是在极端干旱年份,社会亚系统对水分敏感度的贡献有显著提高,例如在1997

年社会亚系统3个指标对系统总体敏感度贡献率达到了34.5%。这表明在干旱扰动增大时,系统内人均饮水不足(人口总量)、抗旱知识的匮乏(知识程度)将成为影响系统恢复力的关键因子。

2001年以来,榆中县社会—生态系统对干旱的恢复力呈逐渐提高的趋势,从系统内部水分敏感性分析,经济亚系统4个指标的累积贡献不断下降,而社会和生态亚系统的影响逐渐增大。人均收入的提高、收入的多元化都会大大增强系统应对干旱的能力,提高系统恢复力。

## 4 结语

在半干旱地区,如何应对干旱干扰需要整合生态、经济和社会多学科知识。本文提出了社会—生态系统对干旱的恢复力的概念,即半干旱地区社会—生态系统对干旱的恢复力一方面取决于外部的干旱扰动压力,另一方面取决于其内部各亚系统对干旱(水分)的敏感程度,并与二者的乘积呈反比。在这个线性模型的基础上对甘肃省榆中县进行了研究,结果表明榆中县社会—生态系统的经济状况是影响其对干旱恢复力的主要因素,而在极端干旱年份,社会亚系统状况对恢复力的影响程度将会提高,系统内人均饮水不足(人口总量)、抗旱知识的匮乏(知识程度)将成为影响系统恢复力的关键因子。

在任何一个社会—生态系统中,其社会、经济和生态亚系统之间存在复杂耦合关系显然很难用一个简单的线性模型加以完整的表述<sup>[7,16]</sup>。例如在本文选择的水分敏感性指标中,指标与指标之间可能存在着非线性的相关关系(例如农业收入、粮食产量、灌溉系数之间)。另一方面也存在部分数据

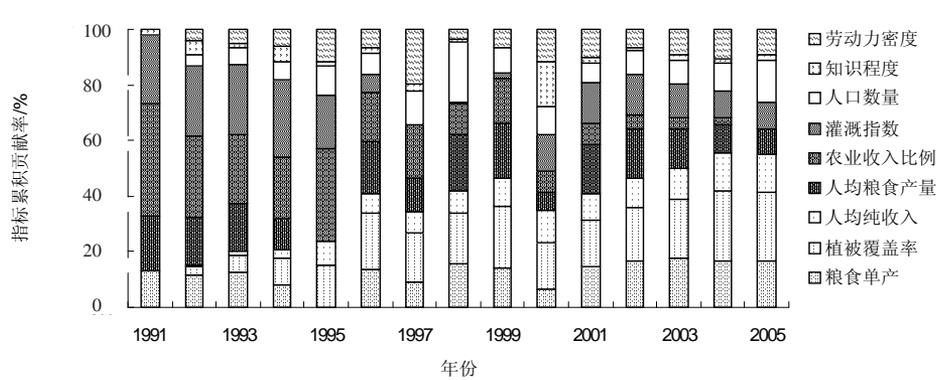


图6 榆中县社会—生态系统不同指标变量对干旱水分敏感贡献

Fig.6 Contributions of different indicators to water sensitivity in the Yuzhong social-ecological system

难以准确统计的问题。例如农村社会关系中占支配地位的是血缘关系,这种血缘关系在社区的经济、政治和社会生活中发挥着重要的作用,血缘关系连同其他社会关系对恢复力也有重要影响,但这种关系只能定性描述。此外,作为一个复杂的巨系统(例如榆中县)是由大量系统构成的,本文建立的指标体系尚不能够完整地反映干旱扰动下的社会—生态系统构成。例如,随着近年来社会经济的不断发展,各种抗旱工程的投入、抗旱管理水平的提高、节水、抗旱技术的应用及推广,以及相关政策的实施等都将有助于降低系统的水分敏感性,提高系统对干旱的恢复力。

## 参考文献

- [1] Adger W N. Building resilience to promote sustainability. IHDP Update, 2003, 2: 1-3.
- [2] 赵聚宝, 李克煌. 干旱与农业. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [3] 王静爱, 孙恒, 徐伟, 等. 近50年中国旱灾的时空变化. 自然灾害学报, 2000, 11(2): 1-6.
- [4] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 等. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析定量评价. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78-83.
- [5] 苏筠, 李莲华, 吴之正, 等. 农业旱灾形成过程中的承灾体脆弱性分析: 以湖南鼎城为例. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 83-88.
- [6] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会—生态系统恢复力研究综述. 生态学报, 2007, 27(12): 785-792.
- [7] Gunderson L H, Holling C S. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington, DC: Island Press, 2002.
- [8] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5-13.
- [9] Folke C, Carpenter S R, Elmqvist T, et al. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a

- world of transformations. *Ambio*, 2002, 31(5): 437-440.
- [10] Walker B, Carpenter S, Anderies J, et al. Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*, 2002, 6(1): 14-30.
- [11] Carpenter S R, Walker B, Anderies J M, et al. From metaphor to Measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765-781.
- [12] Carpenter S R, Westley F, Turner M G. Surrogates for resilience of social-ecological systems. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 941-944.
- [13] Zurlini G, Rossi O, Amadio V. A landscape approach to biodiversity and biological integrity planning: The map of the Italian nature. *Ecosystem Health*, 1999, 5(4): 294-311.
- [14] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 853-861.
- [15] Costanza R, Wainger L, Folke C, et al. Modeling complex ecological and economic systems. *Bioscience*, 1993, 43: 545-555.
- [16] Adger W N. Social and ecological resilience: Are they related? *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.

## A Quantitative Research on the Resilience of Social-ecological System to Drought in the Semiarid Area

WANG Jun<sup>1,2</sup>, YANG Xinjun<sup>1</sup>, LIU Wenzhao<sup>2</sup>

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

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS-MWR, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Drought has been a crucial meteorological factor which limits the agricultural development and eco-environment construction in the northwest area of China. In the past decades, many Chinese scientists tend to explore the cause of drought from the perspective of biophysical aspects, while the accumulated body empirical evidence identifies that social system has enormous impacts on disasters (drought) as well. Nature and man-kinds are tightly linked, and they are coupled systems which can be termed as social-ecological systems. What can we do to gain a deep understanding about the interacting processes and the mechanisms between nature and society, and then build a scientific foundation for drought defying decision-making? Resilience, as a new theory, provides an idea to solve this problem. Resilience refers to the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing changes, so as to retain essentially the same function, structure, identity, and feedbacks. Since resilience is a buffer in the social-ecological systems to the external perturbations and shocks, the management that builds resilience can sustain social-ecological systems when facing surprise, unpredictability, and complexity. Yet many studies mainly focus on description and qualitative analysis, which cannot offer practical instructions to solve specific problems, therefore, the attempt to quantify resilience of the systems, which can prevent social-ecological systems from sliding into some undesirable stable states, has become an imperative trend. Based on the statistic data and remote sensing images, the resilience of the social-ecological system to drought in Yuzhong County of Gansu Province during the last 15 years was calculated by integrating statistics approaches and GIS. The results indicate that the resilience of Yuzhong County depends on the interactions between internal factors (social, economic and natural) and external factors (aridity), and also highlight the need for local managers to be aware of how differently towns respond to drought, which is of great significance for managers to make robust managing strategies.

**Key words:** social-ecological system; resilience; drought; Yuzhong County

本文引用格式:

王俊, 杨新军, 刘文兆. 半干旱区社会—生态系统干旱恢复力的量化研究. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1385-1390.