

鄂尔多斯社会—生态系统恢复力评价及驱动机制研究

胡蒙蒙^{1,2}, 张军民¹, 黄锦楼², 赵波², 程冠全²

(1. 石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832003;

2. 中国科学院 生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:在对社会—生态系统恢复力概念界定的基础上,运用熵值法和集对分析相结合的研究方法,从脆弱性、应对能力两大层面出发,构建复合系统恢复力测度模型,以典型矿业城市鄂尔多斯为例,分析恢复力的演变趋势及驱动机制。结果表明:(1) 应对能力对恢复力的影响居于主导地位,2001—2013年鄂尔多斯社会—生态系统恢复力指数呈现缓慢上升趋势。(2) 作用因子对于恢复力的驱动主要以二次线性关系为主,具有较大的不确定性。建议发展除矿产资源开采以外的支撑性产业,减少资源开发对环境带来的负面影响,鼓励节约集约利用资源,有效提高系统的应急能力,增强复合系统的恢复力。

关键词:社会—生态系统; 恢复力; 矿业城市; 鄂尔多斯

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0191-07

Study on Evaluation and Driver of Socio-Ecological System Resilience in Ordos

HU Mengmeng^{1,2}, ZHANG Junmin¹, HUANG Jinlou², ZHAO Bo², CHENG Guanquan²

(1. College of Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: On the basis of the social-ecosystem resilience concept, combining the entropy method and set pair analysis, starting from two levels, the fragility and the response capacity, we build resilience measure model of compound system. Apart from this, taking mining city of Ordos as an example, we analyzed the evolution trend and driving mechanism of resilience. The results are as follows. (1) The response capacity plays the dominant influence part in resilience. During the period from 2001 to 2013, the socio-ecological system resilience index increased slowly in Ordos. (2) There is mainly a quadratic linear relation between acting factor and resilience, which has great uncertainties. It is suggested that we need to develop support industries except to the mineral resources exploitation, and reduce the negative impact of resource development on the environment. In addition to this, conservation and intensive utilization of resources, effective improvement of the emergency response of system, and thereby enhancement of the resilience of complex systems should be encouraged.

Keywords: socio-ecological system; resilience; mining city; Ordos

受气候变化和高强度人类活动的影响,全球生态系统发生巨大变化,成为可持续发展的重要障碍。在这样的环境背景下,Holling提出恢复力(Resilience)概念表明生态系统面对扰动保持在一个特定状态的能力^[1],成为推动生态系统可持续发展的一种新理念,这使得阈值、关键点、多稳态等特征成生态系统研究的重点^[2],进入到复杂性思维时期^[3]。在2002年瑞典召开的“可持续发展世界峰会”,提出将恢复力研究当作补充内容加入《21世纪议程》中^[4]。目前,恢复力研究从先前的生态恢复力转向社会—生态系统恢复力的研究,Holling和Gunderson将恢复力引入

社会—生态系统,将其定义为社会—生态系统经受干扰并维持其功能的能力^[5],与此同时Kates在《Science》发文,将特殊地区的自然—社会系统的恢复力研究列为可持续科学的核心问题之一^[6]。复杂系统的行为往往由不同作用因子控制,现阶段学者研究多是基于社会—生态系统的理论框架,对恢复力的定义不尽相同,表现形式也有所差异,多为定性分析,通过借用恢复力的概念来更好地评价复合系统的状态。

要从理论向实际应用过渡,需对恢复力进行测度,并对驱动机制进行探究,为城市社会—生态系统健康发展提供科学依据。

矿业城市问题是国内学者关注的重点之一,大多以煤炭^[7]、石油^[8]城镇为对象,集中在脆弱性问题的探讨,李鹤等^[9]、王乃举等^[10]、孙平军等^[11]、顾康康等^[12]分别从社会、经济、生态角度对矿业城市脆弱性进行评价。研究侧重从单一视角评价矿业城市脆弱性特征,鲜有将社会、经济、生态作为复合系统综合研究矿业城市问题。而恢复力和脆弱性关系如一个双螺旋结构,两者的关系并不确定,仅考虑系统的脆弱性具有一定的局限性,应综合考虑脆弱性与应对能力。因此,本文以恢复力理论为研究框架,建立矿业城市社会—生态系统恢复力测度框架,对鄂尔多斯2001—2013年社会—生态复合系统恢复力进行测度,并揭示恢复力的驱动机制,从而为矿业城市可持续发展研究提供一个新的角度,为矿业社会发展、经济提升、生态建设提供有价值的参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部(37°28′—40°52′N, 106°30′—110°29′E),区域总面积 87 141 km²。下辖东胜区 1 个区,达拉特旗、准格尔旗、鄂托克前旗、鄂托克旗、杭锦旗、乌审旗、伊金霍洛旗 7 个旗。总体地势东高西低,属典型的中温带半干旱大陆性气候,年均气温 5.3~6.7℃,年降水量 170~350 mm。2013 年,全市总人口 154.34 万人,其中农业人口 105.49 万人,地区生产总值 3 955.9 亿元,占自治区总量的 23.5%,其中工业生产总值为 2 109.53 亿元,占全市总产值的 53.3%。鄂尔多斯市矿产资源丰富,主要有煤、天然气、煤层气、天然碱等,素有“地下煤海”之称,煤田分布面积占全市土地总面积的 70%,已成为我国 21 世纪大型综合能源接续基地。经济的发展在很大程度上取决于矿产资源的开发,加上地处半干旱区域,具有典型的脆弱性特征。2001 年伊克昭盟经国务院批准正式改名为鄂尔多斯市,本文时间维度的分析主要针对更名之后。

1.2 研究方法

1.2.1 测度方法选取 集对分析(Set Pair Analysis, SPA)是由赵克勤学者提出,从同、异、反三个方面研究事物确定性与不确定性,全面刻画不同事物联系的理论,已在自然科学、社会经济等研究领域得以广泛应用^[13]。矿业城市社会—生态系统受产业、政策、市场、自然等不确定因素影响较大,本文基于集对分析理论对其恢复力进行测度,将矿业城市社会—生态系统恢复力评价转化为集对间的比较分析,把社会—生态系统指标体系与既定的指标评价标准看成一个集对,建立集对的

同一、对立、差异的联系度表达式,获得量化恢复力的指标,具体思路见参考文献^[14]。

对于多属性评价问题,可记为 $Q = \{F, D, E, W\}$,其中,评价方案集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$,评价指标集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$,评价对象集为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$, e_k 为第 k 个被评价对象,评价指标权重集为 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。同一空间内对比确定评价方案中最优的评价指标构成最优评价集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,各评价指标中最劣评价指标构成最劣评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。集对 $\{F_m, U\}$ 在 $[U, V]$ 上的联系度为:

$$\begin{cases} u(f_m, U) = a_m + b_m i + c_m i \\ a_m = \sum \omega_p a_{pk} \\ c_m = \sum \omega_p c_{pk} \end{cases} \quad p = (1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a_{pk} 和 c_{pk} 分别为评价指标 d_{pk} 与集合 $[v_p, u_p]$ 的同度度和对立度; ω_p 为第 p 项指标的权重。当 d_{pk} 对评价结果起正向作用时:

$$\begin{cases} a_{pk} = \frac{d_{pk}}{u_p + v_p} \\ c_{pk} = \frac{u_p v_p}{d_{pk} (u_p + v_p)} \end{cases} \quad (2)$$

当 d_{pk} 对评价结果起负向作用时:

$$\begin{cases} a_{pk} = \frac{u_p v_p}{d_{pk} (u_p + v_p)} \\ c_{pk} = \frac{d_{pk}}{u_p + v_p} \end{cases} \quad (3)$$

方案 f_m 与最优方案集 U 的相对贴近度 r_m 可定义为:

$$r_m = \frac{a_m}{a_m + c_m} \quad (4)$$

r_m 反映被评价方案 f_m 与最优方案集 U 的联系度, r_m 值越大,表示被评价对象越接近最优方案。目前确定指标权重的方法有很多,大致分为客观赋权法和主观赋权法两大类。主观赋权法主要有层次分析法(AHP)、专家打分法等,在一定的程度上存在较大的主观随意性。因此,本文选择客观赋权法中的熵值法确定集对分析中的权重,根据指标的影响和大小值进行数据标准化,从而在一定程度上避免了主观因素带来的偏差,具体步骤可见相关文献^[15]。

1.2.2 构建指标体系 矿业城市社会—生态系统的特殊性,到目前为止尚未形成固定的恢复力测度指标体系,理论上恢复力测度由社会、文化、经济、生态、政策五个要素组成^[16],而文化、政策多通过其他因子的影响而显现,故选取社会、经济、生态 3 个子系统为测度单元,结合相关参考文献^[17-19],遴选 36 项指标因子(表 1),对矿业城市社会—生态系统进行测度。

表 1 矿业城市社会—生态系统恢复力测度指标体系

指标体系		指标名称及单位	指标释义影响性质	指标名称及单位	指标释义影响性质
社会 系统 恢复力	脆弱性 指标	总人口数(万人)	衡量系统人口特征(—)	失业人数(人)	衡量系统稳定(—)
		城市化率(%)	衡量系统人口结构(+)	交通事故发生数(起)	衡量系统安全(—)
		货运总量(万 t)	衡量系统区位优势条件(+)	在岗职工工资总额(亿元)	衡量系统社会效益(+)
		每万人拥有公共车辆(标台)	衡量系统基础设施状况(+)	公路里程(km)	衡量系统基础设施状况(+)
	应对能力 指标	地方财政支出(万元)	衡量社会财政支出力度(+)	个人储蓄存款余额(亿元)	衡量社会存储状况(+)
		社会保障和就业支出(万元)	衡量社会稳定性和就业支持力度(+)	医院、卫生院床位数(张)	衡量医疗支持力度(+)
经济 系统 恢复力	脆弱性 指标	工业总产值(亿元)	衡量系统工业效益(+)	规模以上重工业总产值(万元)	衡量系统重工业经济效益(—)
		原煤产量(万 t)	衡量系统煤炭生产效益(—)	工业增长弹性系数(%)	衡量工业在整个经济发展的健康程度(+)
		第二产业产值占 GDP 的比重(%)	衡量第二产业在国民经济中的地位(—)	社会消费品零售总额(万元)	衡量零售业在整个经济发展的健康程度(+)
		第二产业就业人数(万人)	衡量系统第二产业规模(+)	农林牧渔业总产值(万元)	衡量经济总量(+)
	应对能力 指标	财政总收入(亿元)	衡量地方政府经济实力(+)	人均 GDP(元/人)	衡量经济发展状况(+)
		居民人均货币工资(元)	衡量居民收入水平(+)	社会固定资产投资完成额(亿元)	衡量资本投资额度(+)
生态 系统 恢复力	脆弱性 指标	人口密度(人/km ²)	衡量土地承载力(—)	污水排放量(万 t)	衡量废水排放导致的生态压力(—)
		城市建成区面积(km ²)	衡量土地系统压力(—)	人均日生活用水量(L)	衡量人类消耗导致的生态压力(—)
		液化石油气供气量(万 m ³)	衡量能源供给压力(—)	发电量(亿 kwh)	衡量用电导致的生态压力(—)
		耕地面积(万 ha)	衡量土地系统压力(—)	农药使用量(t)	衡量农业生态环境安全(—)
	应对能力 指标	生活垃圾处理量(万 t)	衡量固体废弃物处理情况(+)	园林绿地面积(ha)	衡量绿色空间(+)
		污水日处理量(万 t)	衡量污水处理能力(+)	造林面积(万 ha)	衡量人工恢复环境(+)

注：资料来源于内蒙古统计年鉴(2002—2014)、鄂尔多斯统计年鉴(2002—2014)、中国城市统计年鉴(1991—2009)、鄂尔多斯国民经济和社会发
展统计公报(2002—2014)。

2 结果与分析

2.1 社会—生态系统恢复力评价分析

根据熵值法确定的各指标权重及公式(1—4),对 2001—2013 年鄂尔多斯三个子系统及总系统的脆弱性指数、应对能力指数以及恢复力指数进行计算,并借鉴与之相关的研究成果^[10,20],将系统脆弱性、应对能力及恢复力在(0,1)的范围内划分为三级,0< r_m ≤0.33 为低级,0.33< r_m ≤0.66 为中级,0.66< r_m <1 为高级,结果分析如下。

2.1.1 脆弱性分析 2001—2013 年鄂尔多斯社会—生态系统脆弱性程度总体保持稳定,呈现略有下降的趋势,脆弱性指数由 2001 年的 0.511 下降到 2013 年的 0.503,处于中等脆弱层级,曲线走势与经济系统脆弱性趋势及阶段划分大致相同(图 1A)。总体规划两个阶段,2001—2008 年缓慢上升阶段,2009—2013 年缓慢下降阶段,结果分析如下:

(1) 缓慢上升阶段。脆弱性指数在 0.46~0.57 间,2008 年的脆弱性达到最高,其中煤炭的开采量较 2001 年增加 6.5 倍,重工业发展迅速,给生态环境带来极大的压力,对系统脆弱性带来显著影响。2001—2008 年整个上升阶段,同一度略有升高,对立度下降较明显,煤炭开采、工业开发从起步到繁荣的过程,与相应的污水排放量、发电量、市区人口密度都有一

定的提升,对于系统脆弱性产生显著影响。(2) 缓慢下降阶段。2008 年后,系统脆弱性从 0.567 下降到 0.503,其中生态系统脆弱性指数下降较为明显。耕地面积与农药使用量明显降低,工业增长弹性系数由 65.7%下降到 52.2%,工业的增长较 GDP 的增长有所减缓。城市化率从 2008 年的 29.5%增加到 2013 年的 31.7%,以城市化为推动力,居民生活整体水平有所提升,政府逐步认识到资源保护是工业可持续发展的必要措施,社会—生态系统脆弱性缓慢下降。

2.1.2 应对能力分析 2001—2013 年,鄂尔多斯社会—生态系统应对能力由 0.175 增至 0.836,呈现出急剧上升的趋势,与各子系统应对能力曲线走势基本相同,表明不同系统的应对因子是有所关联的,阶段划分与社会子系统相同(图 1B)。

矿区城市的社会保障措施、基础设施建设逐渐完善,经济发展水平有所提升,矿产资源开发的同时,生态环境保护的力度也有加大。2001—2004 年属于低级应对能力阶段,基础建设、人民生活水平相对较低,矿产资源的开发处于掠夺阶段,2005 年开发向可持续发展方向前行,煤炭开采的数量虽有所上升,但政府对于财政支出大幅度的提高,使得系统的应对能力有所提高。2009 年后,矿产资源开发后的生态恢复工程也有所体现,促使系统应对能力进入到更高的阶段。生态系统应对能力相对其他子系统仍徘徊在中级阶段,其整体走势存在

波动与不稳定,应加强生态系统的应对能力,使得整体的应对能力更加稳定且有所提升,在脆弱性逐渐加强的阶段,应对能力的加强显得尤为重要。

总体上看社会—生态系统的恢复力指数呈现缓慢上升趋势,由2001年的0.369上升到2013年的0.615,系统恢复力指数是子系统共同作用的结果,而生态系统恢复力的影响较大,恢复力指数曲线阶段划分与生态子系统系统大致相同,12 a间均处于中级阶

段(图1C)。社会、经济恢复力指数经历从低级向高级的过程,虽然其脆弱性有所增加,但伴随着强大的应对能力,国民经济和社会发展的总体相适应,达到资源效益、经济效益、社会效益的统一,使得恢复力指数稳定上升。生态系统恢复力呈现缓慢下降的趋势,人类活动不断变动过程中生态系统保持实际的组织能力有所下降,需进一步加大对生态系统恢复的投资,包括增加绿地面积及环保投资等。

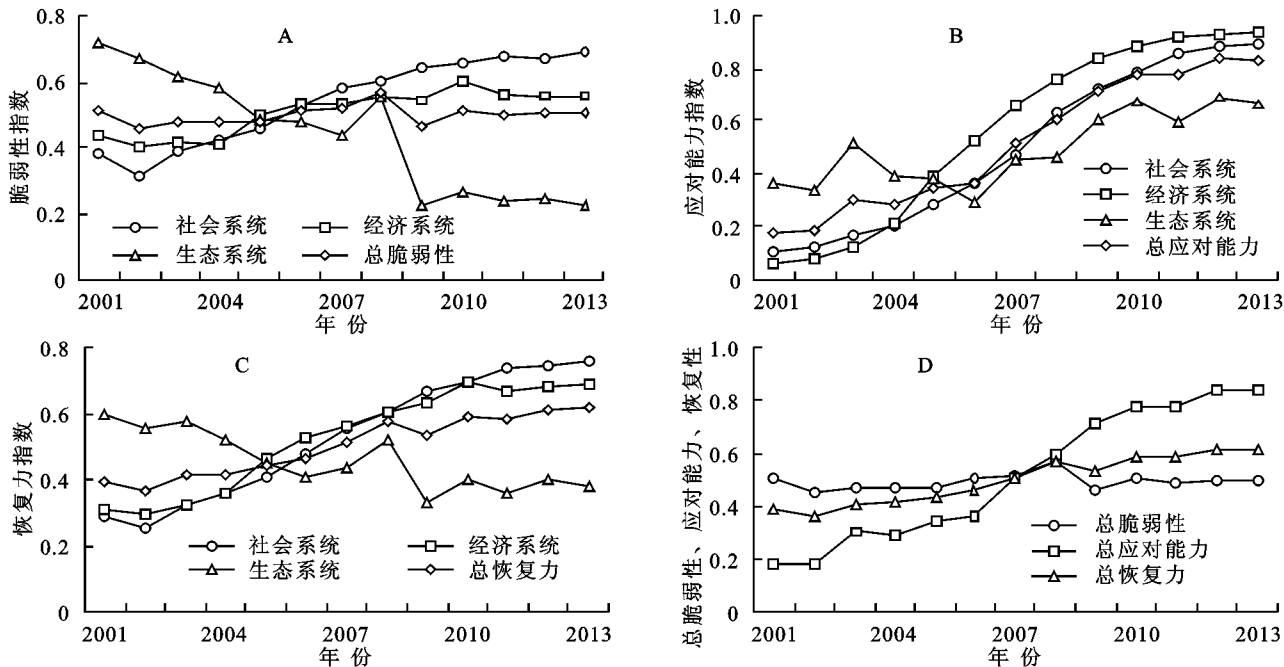


图1 鄂尔多斯市社会—生态系统脆弱性、应对能力、恢复力指数变化趋势

运用回归的方法,对恢复力指数和总脆弱性、应对能力进行分析,揭示脆弱性与应对能力对社会—生态系统恢复力的影响程度,公式为:

$$H=0.687C+0.322Y-0.05 \quad (R^2=0.997)$$

式中: H 、 C 、 Y 分别代表鄂尔多斯社会表示生态系统恢复力、脆弱性和应对能力(模型在1%显著性水平下通过检验)。单位敏感性对复杂系统恢复力的影响程度大于单位应对能力对经济系统脆弱性的影响,敏感性对鄂尔多斯社会表示生态系统恢复力指数起较大作用。结合上述计算结果,对总脆弱性、应对能力和恢复力进行分析,除应对能力由低级上升到高级之外,总脆弱性与恢复力指数在不同年份间均处于中级阶段。利用应对能力的三个阶段,分析总恢复力的变化(图1D)。2001—2004年,系统应对能力处于低级阶段,由于系统自组织能力和相对稳定的脆弱性,使得恢复力指数高于应对能力指数。2005—2008年,应对能力急速提升,但由于脆弱性的牵制,导致恢复力指数落后应对能力指数。2009年应对能力进入高级阶段,恢复力仍保持在中级阶段,一方面说明仅仅依靠应对能力的加强是不够的,另一方面表明投入建

设的过程需要大量的时间。鄂尔多斯矿业城市地处半干旱脆弱区,其生态环境更加敏感,需要减少资源开发对环境带来的负面影响。

2.2 社会—生态系统恢复力驱动分析

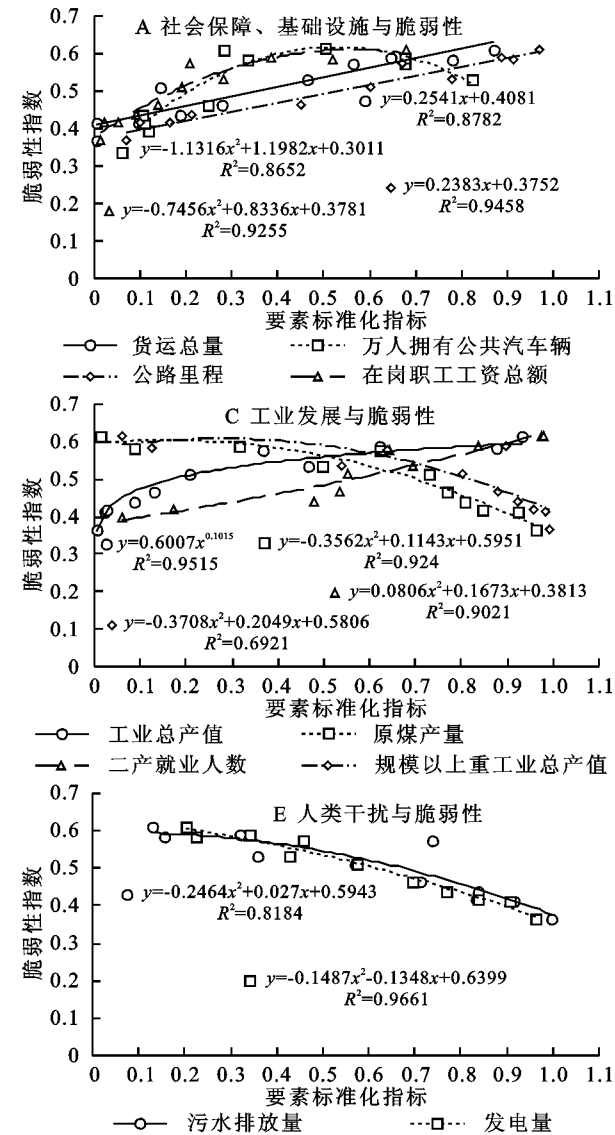
上述结果表明,恢复力缓慢上升,而系统中的某一作用因子发生的任何改变可能会导致社会—生态系统恢复力的变化,因此,本文研究各因子对系统的影响作用,探究其变化的驱动机制。以因子标准化的值作为自变量,将极值的点去掉,消除极值对于整体结果的影响,对各子系统因子与系统恢复力进行相关性分析,结果如下。

2.2.1 脆弱性影响因子分析

(1) 社会系统脆弱性。选取对社会子系统的相关系数 R^2 大于0.5的因子进行分析,主要包含社会保障、基础设施和社会稳定两大类。社会保障、基础设施中,货运总量和公路里程呈现明显的线性正相关关系,随着公路运输、基础设施的发展,有利于建立完善的运输网络,进一步改善投资环境,促进外向型社会的健康发展(图2A)。社会发展中,总人口、城市化率与恢复力呈现出明显的非线性关系。总人口的增

加在给经济带来发展的同时,也会给社会造成负担,导致在一定时间、程度范围内,恢复力难以迅速恢复。城市化对于恢复力的影响呈正 U 型,在城市化初期,对于恢复力的影响呈现负向的作用,只有在城市化达到一定程度及阶段,才会对恢复力的提高具有较大的推动作用(图 2B)。

(2) 经济系统脆弱性。将经济子系统脆弱性分为工业发展和贸易、产值两部分。工业发展的过程中,工业总产值和二产就业人数均与总恢复力指数呈现正向关系,二产就业人数的增加在人员比例上促进工业行业对经济大环境波动中恢复力的提升。劳动力投入与工业产值的提升,均会提升其恢复力。而原煤产量与规模以上重工业总产值呈现明显的非线性负相关,在前期对于恢复力的影响相对较缓慢,但随着其规模的扩大,明显不利于系统的恢复力(图 2C)。社会消费品总额的增大,表明消费对市场及经济发展的拉动作用进一步增强,经济系统的发展越强,其恢复力会逐渐增强(图 2D)。



(3) 生态系统脆弱性。在生态子系统脆弱性中涉及人类干扰和土地压力两大类。人类干扰分项指标中,污水排放量、发电量与恢复力均呈非线性负向关系(图 2E)。发电量与系统恢复力的相关性更为明显, R^2 高达 0.966,表现出明显的负相关,鄂尔多斯的社会发电中,95%以上使用的是火力发电,对于煤炭等资源的消耗更为显著,除此之外对于大气生态系统造成严重破坏。土地压力指标中,城市建成区面积的增加对于恢复力产生一定的负效应,城市扩张给城市带来环境污染、固体垃圾、噪声污染等,在很大程度上造成城市发展的无序紊乱,带来巨大的土地压力,从而造成恢复力的降低。人口密度在起初增长阶段,会引起恢复力的上升,但增长到一定程度,超过一定范围时,其继续增长会导致恢复力的下降(图 2F)。矿业开采及发展给城市带来一定的压力,虽然对恢复力的影响速率和效应有所不同,但在某种意义上均削弱鄂尔多斯矿业城市的社会—生态系统恢复力。

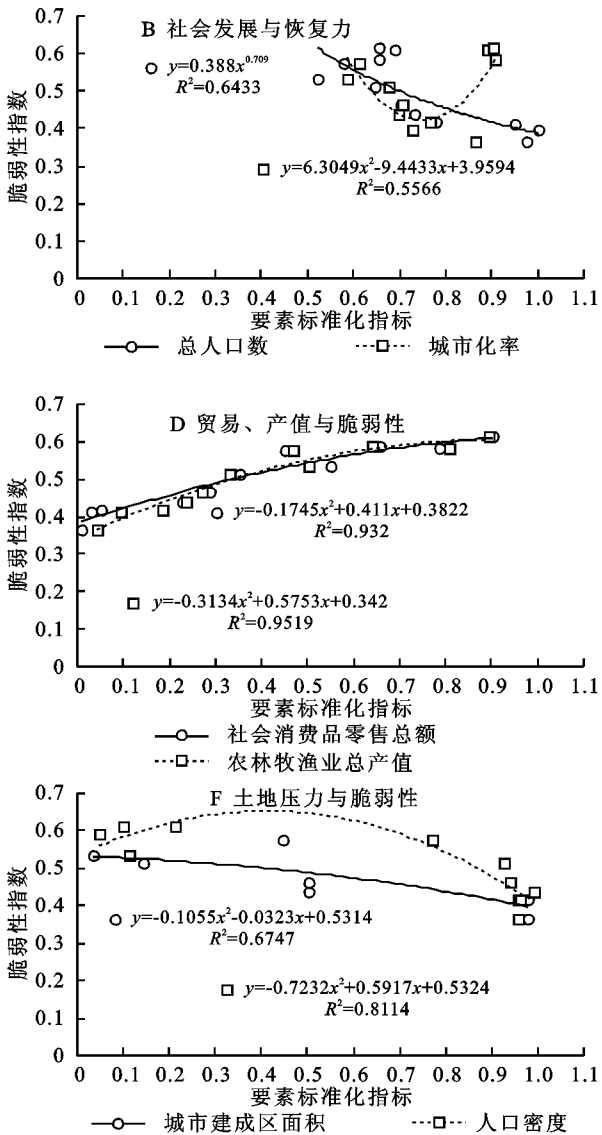


图 2 鄂尔多斯市社会—生态系统脆弱性与恢复力相关性分析

2.2.2 应对能力影响因子分析 将复杂系统的应对能力分成社会、经济、生态三个子系统。在社会子系统中,各因子对于恢复力的影响趋于一致,在恢复力较低的时,其投入的增加可以较快提高系统恢复力,当恢复力水平较高时,其走势相对平缓,各应对能力此时具有一定的局限性。不同因子间具有相互关联性,个人拥有储蓄存款余额的增加表明生活经济水平的提高,从而促进地方财政支出增加,包括社会保障和就业、医疗等有关民生的支出,从而有效的提高系统应急和风险抗御能力(图 3A)。

在经济子系统中,各因子均与恢复力指数呈现出明显的非线性正相关关系, R^2 均大于 0.92 且各曲线走势较为相似。表明个人经济收入的增加以及经济投资的提升,会提高复杂系统的应对能力,进而促进系统恢复力的升高。固定资产的投资是经济总需求的一个重要组成部分,与此同时通过提高居民收入增加经济的活跃度,随着政府、个人的资产都增加,对系统恢复力起直接促进作用(图 3B)。

在生态子系统中,选取 R^2 大于 0.5 具有较大相关性的,主要包括园林绿地面积、生活垃圾清运量 2 个与恢复力有明显正相关的因子,从相关性分析中发现生活垃圾处理量对恢复力的影响较大,其处理与否对矿业城市的生态环境具有重要影响,对于矿业城市而言,土地是其生态子系统最重要的因素之一,保护土地安全是生态处理中的重要组成部分,对系统恢复力起直接促进作用。而园林绿地面积的增加,一部分增强土地资源的活力,与此同时改善生活的环境,其对恢复力增加的效果更为明显,呈现持续上升趋势。应该鼓励节约集约利用资源的项目建设,降低能源、水、土地消耗强度,从而增强系统的恢复力持续发展(图 3C)。

2.2.3 驱动机制探究 综合上述的驱动因子分析,得到各因子对于社会—生态系统的影响机制,不同的作用因子对于恢复力的驱动有所不同,主要分为以下三种模式(图 4):

(1) 线性关系:驱动因子与恢复力间呈现出线性关系的相对比较单一,仅有社会基础设施存在线性递增(a)的关系,正向驱动因子与恢复力呈现线性递增关系,货运总量与公路里程因子值的增大对恢复力的提高有着直接影响。且两因子也存在相应的关系,当货运量的增加会明显提高公路里程,从而表明基础设施中道路系统的完善与城市间的贸易往来的增加,对恢复力的提升起一定的促进作用。

(2) 二次线性关系:呈现出 U 型、倒 U 型曲线或两种曲线的某个阶段,驱动因子与恢复力指数呈现完

整 U 型(b4)曲线关系的指标仅涉及社会子系统中的城市化率,在恢复力较高时,城市化的增加对恢复力的作用会降低,但当恢复力降到一定的临界值,城市化的增加反而会促进恢复力的提高。而呈现 U 型曲线中递增阶段(b2)的仅有经济子系统中的二产就业人数,对于恢复力的影响呈现逐渐上升的趋势。

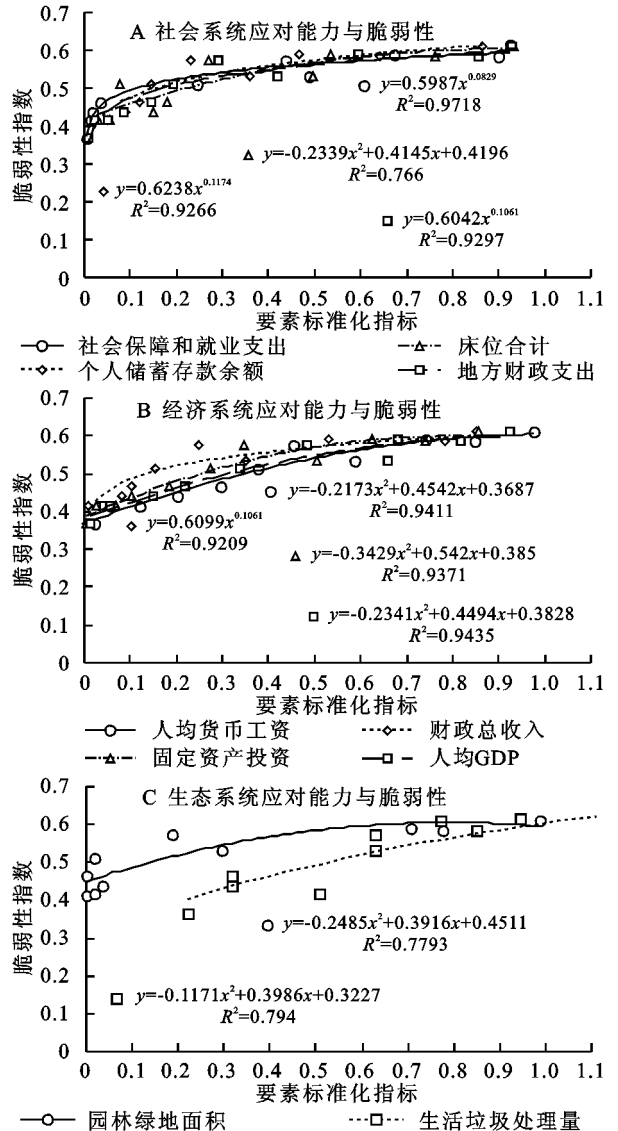


图3 鄂尔多斯市社会—生态系统应对能力与恢复力相关性分析

与恢复力呈现倒 U 型曲线关系(b3)的主要涉及脆弱性指标中的基础设施和土地压力。在恢复力较低时,其发展可逐步提高恢复力,当恢复力发展到较高阶段时,恢复力随着驱动因子的上升反而有所下降。对于应对能力而言,多处于倒 U 型曲线上阶段(b5),如医院、卫生院床位数、人均工资、财政收入、园林绿地面积等,在前期采取的应对措施,对于恢复力的提升起到较大的促进作用,随后的增加对恢复力的影响不明显。而工业发展中负向影响因子与人

类干扰对于恢复力表现为倒 U 型曲线下降阶段 (b1),对于工业发展与人类干扰而言,具有较强的破坏能力,在初期对于恢复力的作用相对较低,但随着干扰的增大,恢复力会急剧下降。

(3) 幂函数关系:主要呈现上升和下降两种趋

势,其中正向的工业发展和社会系统的应对能力多呈现上升趋势(c1),作用形态主要表现为在恢复力低的前期,驱动因子对于恢复力的提升效果处于急速上升阶段,随后趋向平稳。总人口数与恢复力呈现非线性递减关系,但是其下降速率有所减缓。

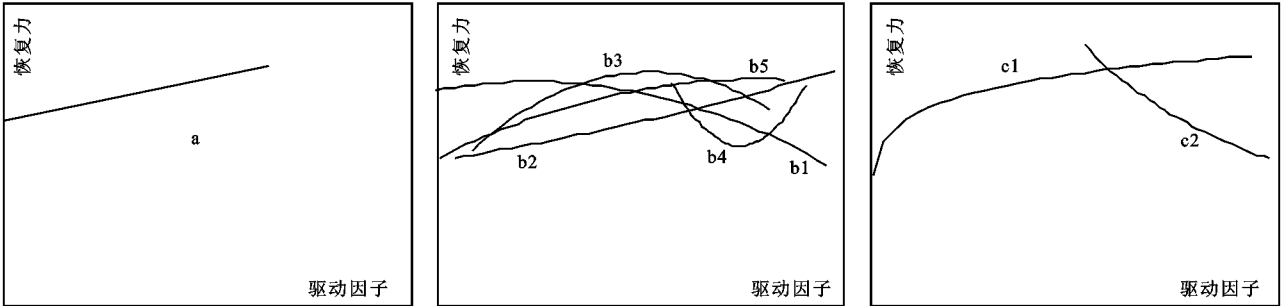


图 4 鄂尔多斯市社会—生态系统恢复力驱动因子曲线

3 讨论

本文通过熵值法和集对分析构建社会—生态系统恢复力评估模型,对鄂尔多斯复合系统脆弱性、应对能力、恢复力时序变化特征及主要驱动因素进行深入分析,这对复合系统恢复力评价以及资源型城市社会、经济、生态转型研究具有借鉴意义。各驱动因子的作用方向、速率的不确定性,更印证集对分析和回归方法测度的适用性。但本文研究时间段选择的相对较短,其结果的差异性不是很明显,社会—生态系统的驱动因子指标和模型还有待进一步完善及优化。在今后的研究中应建立更加完整的评价体系,对驱动因子进行重要性排序,并开展恢复力及可持续性的耦合分析。

4 结论

2001—2013 年鄂尔多斯社会—生态系统脆弱性指数由 0.511 下降至 0.503,应对能力指数由 0.175 增至 0.836,恢复力指数由 0.369 上升至 0.615。作为由脆弱性、应对能力共同作用并具有深刻涵义的恢复力,它强调复杂系统在演变过程中人类的作用、系统的自组织与适应力。复杂生态系统脆弱性虽有所增加,但伴随着强大的应对能力,国民经济和社会发展的总体相适应,使得恢复力指数稳定上升。在这种深度复杂形势下,关键在于找出除矿产资源开采以外的支撑性产业,减少资源开发对环境带来的负面影响。

复杂系统总恢复力的提升是子系统共同作用的结果。不同驱动因子对于复杂系统的作用尺度不相同,矿业的开采及发展给城市带来一定的压力,虽然对恢复力的影响速率和效应有所不同,但在某种意义上削弱鄂尔多斯矿业城市的社会—生态系统恢复力。在恢复力的不同阶段,驱动因子影响的作用效果呈现

不同。应提高社会投入,鼓励节约集约利用资源,降低能源、水、土地消耗强度,从而有效的提高系统应急和风险抗御能力,增强系统的恢复力。

从作用因子对于恢复力的驱动模式而言,主要分为三种:线性影响主要集中在社会基础设施子系统的要素上,而二次线性影响主要集中在社会经济及生态脆弱因素及应对能力要素上,幂函数影响主要集中在工业、社会发展的单因子和社会系统的应对能力上,各驱动因子在不同阶段的影响方向及速率各不相同,驱动因子的影响主要二次线性关系为主。

参考文献:

[1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.

[2] Robert M M. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states[J]. Nature, 1977, 269(6):471-477.

[3] Hillmer-Pegram K C. Understanding the resilience of dive tourism to complex change[J]. Tourism Geographies, 2013,16(4):598-614.

[4] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, et al. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations[J]. AMBIO: A journal of the human environment, 2002,31(5):437-440.

[5] Holling C S, Gunderson L H. Resilience and adaptive cycles[C]//Gunderson L H, Holling C S. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington, DC: Island Press, 2002:25-62.

[6] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development: sustainability science [J]. Science, 292(5517):641-642.

- [10] 杨尚武,张勃. 基于 SPOT NDVI 的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2014, 33(2): 455-461.
- [11] 刘尧文,沙晋明. 基于 Landsat 影像的多时相植被覆盖度与地形因子关系研究:以平潭岛为例[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2016, 4(32): 89-98.
- [12] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等. 基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 518-524.
- [13] 张含玉,方怒放,史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [14] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [15] 张莉,温仲明,苗连朋. 延河流域植物功能性状变异来源分析[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6543-6552.
- [16] 温仲明,焦峰,焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1897-1904.
- [17] 秦伟,朱清科,张宇清,等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403-409.
- [18] 杨士梭,温仲明,苗连朋,等. 黄土丘陵区植物功能性状对微地形变化的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3413-3419.
- [19] 马娜,胡云锋,庄大方,等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 251-256.
- [20] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [21] 李智广编著. 水土流失测验与调查[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [22] Day F P, Monk C D. Vegetation patterns on a southern Appalachian watershed[J]. Ecology, 1974, 55(5): 1064-1074.
- [23] 额日敦同拉嘎. 基于 DEM 的内蒙古大青山林地景观格局分析[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2013.
- [24] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1754-1760.
- [25] 程圣东,李占斌,鲁克新,等. 文安驿流域植被覆盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(2): 145-150.
- [26] 崔晓临,赵娟,白红英,等. 基于 MODIS NDVI 的陕西省植被覆盖变化分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 87-93.
- [27] 闫瑞,张晓萍,闫胜军,等. 1995—2014 年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2016, 37(11): 1598-1603.
- [28] Auslander M, Nevo E, Inbar M. The effects of slope orientation on plant growth, developmental instability and susceptibility to herbivores[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3): 405-416.
- [29] 黄俊,吴普特,赵西宁,等. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 29-37.
- [30] 党晶晶,赵成章,李钰,等. 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 23-31.

~~~~~

(上接第 197 页)

- [7] 李博,佟连军,韩增林. 东北地区煤炭城市脆弱性与可持续发展模式[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 361-372.
- [8] 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.
- [9] 李鹤,张平宇. 东北地区矿业城市社会就业脆弱性分析[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 751-760.
- [10] 王乃举,周涛发. 矿业城市经济系统脆弱性评价:以铜陵市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 49-53.
- [11] 孙平军,修春亮. 脆弱性视角的矿业城市人地耦合系统的耦合度评价:以阜新市为例[J]. 地域研究与开发, 2010, 29(6): 75-79.
- [12] 顾康康,刘景双,王洋,等. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 759-764.
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 2000: 1-7.
- [14] 王文圣,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析[M]. 北京:科学出版社, 2010: 21-33.
- [15] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.
- [16] Kelly C, Ferrara A, Wilson G A, et al. Community resilience and land degradation in forest and shrubland socio-ecological systems: Evidence from Gorgoglione, Basilicata, Italy[J]. Land Use Policy, 2015, 46: 11-20.
- [17] 苏飞,张平宇,李鹤. 中国煤矿城市经济系统脆弱性评价[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 907-916.
- [18] 王乃举,周涛发. 矿业城市经济系统脆弱性评价:以铜陵市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 49-53.
- [19] 杨艳茹,王士君,陈晓红. 石油城市经济系统脆弱性动态演变及调控途径研究:以大庆市为例[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 456-463.
- [20] 王群,陆林,杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 779-795.