

基于 NDVI 的社会-生态系统多尺度干扰分析 ——以甘肃省榆中县为例

王 俊^{1,2,*}, 孙 晶¹, 杨新军¹, 刘文兆², N. Zaccarelli³, 张向龙¹, 汪兴玉¹

(1. 西北大学城市与资源学系, 陕西西安 710127; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 3. University of Salento, Italy)

摘要:作为人类与自然界耦合的社会-生态系统是一种动态等级结构, 需要以多尺度的视角进行分析。恢复力作为社会-生态系统的重要属性是指系统进入新状态前可以承受的干扰大小, 由此可见系统所受到的干扰在恢复力的研究中至关重要, 但由于社会-生态系统的复杂性, 目前尚缺乏对干扰量化研究的案例。选取社会-生态系统运行的驱动因子——干扰作为研究对象, 将遥感技术中对植被覆被/变化敏感的 NDVI 指数作为干扰反馈变量, 采用移动窗口运算法则, 以一个行政单元(甘肃省榆中县)为研究对象, 提出了社会-生态系统多尺度干扰的一种计算方法, 从而为评价社会-生态系统恢复力、构建生态保护网络、增强生态系统对环境变化(土地覆被/变化、生境破碎化)的适应能力、探索可操作的社会-生态系统案例研究模式提供了技术支持。

关键词:干扰; 多尺度; 社会-生态系统(SES); 恢复力; 榆中县

文章编号: 1000-0933(2009)03-1622-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

An analysis of disturbance on social-ecological system at multiple scales based on NDVI, case study in Yuzhong county of Gansu Province

WANG Jun^{1,2,*}, SUN Jing¹, YANG Xin-Jun¹, LIU Wen-Zhao², N. Zaccarelli³, ZHANG Xiang-Long¹, WANG Xing-Yu¹

¹ Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

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

³ University of Salento, Italy

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1622 ~ 1628.

Abstract: Social-ecological systems are dynamic, non-equilibrium and hierarchical and as such require multi-scale analyses to reveal how they are structured and to formulate hypotheses about possible regulatory mechanisms. The resilience of social-ecological systems is the magnitude of exogenous disturbance that a system can experience without undergoing a regime shift under specified conditions, functions or processes. Here the disturbance which plays a utilitarian role in the study of resilience refers to any relatively discrete event in space and time that disrupts ecosystem, community, or population structure and changes resources, substrates, or the physical environment. Based on remotely sensed response index — NDVI and moving window algorithm — we describe an evaluation technique to quantify multi-scale disturbance that has resulted from long-term natural and man-induced interactive disturbance regimes. We use this technique to investigate how human disturbance may affect environmental conditions of areas at different spatial scales. Together the technique represents an operational framework for defining critical landscape thresholds as provided by scale domains, habitat adaptive cycles, and resilience by which scale-dependent ecological models could be developed, and applied. The potential of this approach for planning and management of habitats mosaics is also discussed.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30500077); 中国科学院知识创新工程重要方面资助项目(KZCX2-YW-424); 陕西省自然科学基金资助项目(2006D02)

收稿日期: 2007-10-16; 修订日期: 2008-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangj@nwu.edu.cn

Key Words: disturbance; multi-scale; social-ecological system (SES); resilience; Yuzhong County

几千年来,人类通过改造自然成功满足了自身生存、发展的需求,同时对景观、区域乃至全球生态环境亦产生了深刻影响,人类活动与自然变化相互作用所引起的各种干扰现象正在改变着地球的原生景观,影响着全球的环境变化和生态系统的服务功能。在研究干扰对生态系统的影响时,人们往往局限于某一具体尺度,然而每一具体尺度都同时受到较大尺度和较小尺度在时空上的影响,从而导致研究结果缺乏客观性和准确性,日益发展的遥感技术为此提供了解决方法。NDVI(normalized difference vegetation index 归一化植被指数)常用于分析与土地利用/覆被相关的变化(干扰)^[1];移动窗口运算法则(moving window algorithm)是通过移动窗口并变换窗口尺寸进而实现对影像(景观)多尺度分析的重要工具,所以借助 NDVI 结合移动窗口运算法则可以实现由干扰(与近期土地利用相关的干扰)引起的生态变化及其分布的多尺度分析,同时为管理景观变化、规划景观镶嵌体提供了技术支持。

社会-生态系统(social-ecological system, SES)是人与自然紧密联系的复杂适应系统,具有不可预期、自组织、非线性等特征^[2,3]。Walker 等^[4]提出一个社会-生态系统的运行轨迹可以通过其 3 个属性:恢复力(resilience)、适应力(adaptability)和转化力(transformability)加以描述,其中恢复力是评价系统适应力和转化力的基础,已成为目前研究的重点。Holling^[5]首次将恢复力的概念引入到生态系统的研究中,他将其定义为“生态系统吸收干扰并能继续维持的能力量度。”随着研究的不断深入以及社会-生态系统理论的引入,恢复力的定义也日臻完善。Holling^[6]将恢复力定义为系统承受干扰并维持其功能和控制的能力。Carpenter 和 Walker 等^[7]认为恢复力是干扰的大小,即在社会-生态系统进入新状态前可以承受干扰的大小。Walker 等^[4]将恢复力定义为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。由定义可知,在研究恢复力时主要关心的是系统进入新状态前能承受干扰的大小。当干扰超过恢复力的阈值时,系统就会发生稳态转换(regime shift),即进入新的通常也是更为稳定和非理想的状态中,由此可见,干扰作为社会-生态系统运行的驱动因子在恢复力的研究具有重要意义。这里的干扰是指在一定时空尺度上对生态系统、群落或种群结构造成直接损伤的并改变资源、基底或自然环境的离散事件^[8](相对于诸如演替之类的长时期系统渐变过程,干扰一般为短期事件)。干扰是多种多样的,地震、旱灾、耕种、放牧、城市化都可以改变社会-生态系统的性质,使其进入到非预期的状态中,从而导致地表景观的变化。干扰塑造着景观,景观是干扰的产物^[1,9]。景观是自然、生态和地理的综合体,包括所有的自然与人为格局和过程^[10],在一定程度上可以认为景观是社会-生态系统在地表的物质载体和表现形式,即干扰推动着社会-生态系统的运行,进而通过景观的变化表现出来。在研究社会-生态系统的干扰时,系统的历史记录为人们解决所面临的问题,制定合理可持续的发展规划提供了大量有用信息^[2,11]。通过研究系统的历史记录,分析干扰对系统的作用,进而建立起对系统恢复力和适应能力的评价和预测,已成为目前研究的主要方向之一。本文以甘肃省榆中县为例,通过分析历史上某一时间区间(本研究为 1995~1999 年)的遥感影像,对乡镇尺度社会-生态系统的干扰进行了定量化计算,旨在理解社会-生态系统应对干扰的能力,获取有关系统动态变化的有用信息,进而对系统恢复力和适应能力进行评价,建立起增强系统恢复力和适应能力的机制,从而有效地防止系统进入非预期的状态。

1 研究方法

1.1 研究区概况

榆中县位于东经 103°50′至 104°34′,北纬 35°34′至 36°26′之间,海拔 1430~3670m,面积 3301.64km²,年均气温 6.9℃,年均降雨量 350mm,日照时数 2665.9h。全县共辖 8 镇 16 乡,人口 42.36 万人,其中农业人口 38.5 万人,占总人口的 91%。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;中部为川塬沟壑地带,光照充足,水源丰富,属灌溉农业区;北部山区,干旱少雨,沟壑纵横,植被稀少,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。农耕活动加之常年的干旱已成为榆中县社会-生态系统最主要的干扰,导致当地植被群落退化和破碎化(图 1A)。

1.2 生态反馈变量——NDVI

遥感技术为研究景观格局和过程提供了大量有用数据,已成为分析多尺度上社会-生态系统动态变化的主要信息来源^[12, 13],其中常用的植被标准归一化植被指数(NDVI)可以反映出植被变化与农耕活动、旱灾、虫灾、冰雹和城市化的相关性^[14]。在本文的研究背景中,NDVI 变化可以作为生态系统的反馈变量揭示植被生长状态和覆被变化,同时由于土地利用与覆被的关联性也可以在一定程度上反映出当地社会经济系统的动态特征。

NDVI 计算公式如下:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

式中,NIR (846 ~ 885 nm) 和 Red (600 ~ 680nm) 是 TM (ETM+) 波段的二向反射率。由于 NDVI 的简易性及其与生态研究的密切关系,已被广泛用于与植被覆被变化相关的研究。

本文选取了两时相的榆中县 TM 和 ETM+ 影像,分别获取于 1995 年 6 月 29 日 9:10. 和 1999 年 7 月 18 日 9:04。在半干旱地区植被状况与降水状况和农业活动关系密切,4a 的时间间隔基本可以反映出当地由农业耕种和干旱所引起的景观格局(土地利用/覆被)的变化状况。

1.3 干扰辨识

Petraitis 等^[8]将同一位置上不同年份相同或相近时间上 NDVI 的极端变化(变大或变小)视为干扰,所以这里的极端变化是指当 NDVI 数值变得很大,即植被覆盖很好;NDVI 变得很小,即植被退化严重,甚至成为裸地。干扰有正、负之分,正面的干扰(NDVI 数值增大)可能来自诸如退耕还林/还草等人类活动导致植被生长良好;过度开垦、连年旱灾都可能导致植被退化,出现负面的干扰(NDVI 数值降低)。无论干扰的正负,它都会改变水资源的可获取性、营养的运输和转化,进而通过天敌、竞争者和生存资源的变化改变生物的出生率和死亡率,影响物种的持续力和生物多样性。据此绘制了二值干扰图表示研究区 4a 中景观的变化,同时作为干扰数量分析的基础数据。通过计算两张互相配准影像 NDVI 的差异来辨识干扰,计算方法采用 Zurlini 使用的公式得出^[15]:

$$D(x, y) = \frac{[f_{\tau_1}(x, y) + f_{\tau_2}(x, y)] - m}{\sqrt{S_{\tau_1}^2 + S_{\tau_2}^2 - 2\text{cov}_{\tau_1\tau_2}}} \quad (2)$$

式中, $f_{\tau_i}(x, y)$ 是第 i 年的 NDVI, m 是两时相影像像元差异的均值, $S_{\tau_i}^2$ 是基于一张遥感影像上的所有栅格第 i 年 NDVI 的方差, $\text{cov}_{\tau_1\tau_2}$ 是两年 NDVI 的协方差。

由公式(2)得出一张灰度图,图像直方图基本呈正态分布,根据 Petraitis 有关 NDVI 极端变化的论述,

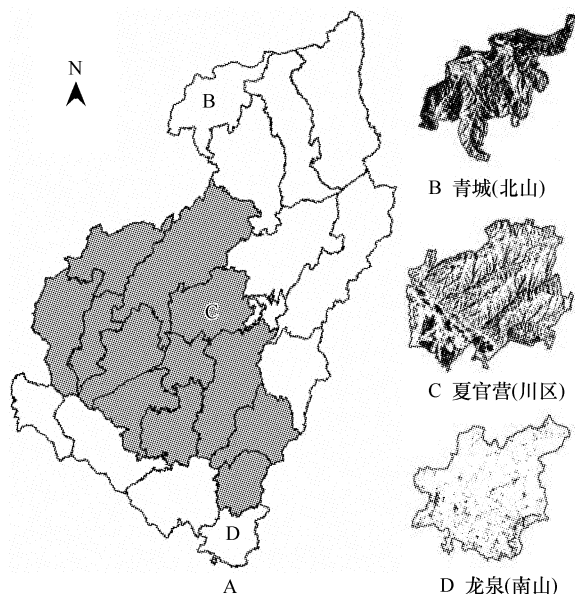


图1 榆中县示意图(A), 乡镇尺度上的干扰图(B, C, D)

Fig. 1 Location of Yuzhong County (A) and Disturbance distribution profile (B, C, D)

图 A 中由灰色显示的乡镇为中部川区,白色为南部和北部山区;图 B, C, D 中黑色栅为受干扰地区,白色栅格为未受干扰地区,下文同 Gray towns in Fig. A represent middle parts of Yuzhong County, which enjoy good socioeconomic conditions, white towns in Fig. A represent south and north parts of Yuzhong County, south parts have a humid climate and north parts are arid and poor; B. Qingcheng (North Part, Mountains and Hills), C Xiaguanying (Middle Part, Alluvial Plain), D Longquan (South Part, Loess Plateau) (Black pixel represents disturbed area, White pixel represents undisturbed area)

NDVI 是一个连续的变量,为了界定干扰有必要定义一个阈值,如果观测到的变化超过阈值的话,该栅格便可以视作“变化的”或“受干扰的”栅格^[9,15]。阈值是根据标准差主观设定的,选择不同的阈值,灰度图中“受干扰”的栅格数是不一样的。在本文中,将 $D(x,y)$ 经验分布的固定比率(10%)设置为干扰的阈值^[1]。这种选择降低了在高比率(例如 40%)分析时出现的“背景噪声”或低比率(例如 1%)时对少数极值的过分强调。虽然阈值的设定是主观的,但是基于我们的经验和相关数据(农业、林业、气象数据),10% 的设定是可以表征 4 年中由于人类活动带来的生态特征的改变,根据公式(2)对两幅影像进行计算,按照设定好的 10% 阈值,制作二值干扰图(图 1 B, C, D)。

1.4 多尺度干扰水平分析

尺度的研究对于景观格局的分析、管理和规划有着重要的意义。小尺度上的景观格局经过尺度筛选重新组合而形成较大尺度上景观格局的过程。大尺度上的空间格局取决于小尺度上的各生态过程的综合作用^[16]。移动窗口运算法则通过变化窗口的大小,对图像中所有栅格逐一计算,从而实现景观的多尺度分析^[1,17](图 2A)。

在生成的二值干扰图上计算干扰的数量,每个栅格上放置 12 个面积固定的窗口,窗口数量的设置从 3×3 (大小为 0.81hm^2) 到 135×135 (1640.25hm^2)。计算每个窗口中干扰的数量^[18],将结果存储于窗口的中心栅格。干扰的数量由窗口中受干扰栅格的比例表示(Pd, Proportion of disturbed pixel, 受干扰栅格比例)(图 2B)。对于某一栅格(位置)而言,随着窗口的变化,可

根据 Pd 的数值分析该位置在不同空间范围上的干扰情况。例如:同一位置上,高 Pd 值小窗口与低 Pd 值大窗口表明一小块高干扰区镶嵌在一大块低干扰区内;窗口 Pd 值为常数,表明该位置在一定空间范围中具有相同的干扰;两个栅格(位置)的 Pd 值变化类似,则它们所在的景观具有相似的干扰格局;图 4A 中所示的就是低干扰的窗口(3×3 , $\text{Pd} = 0.56$)镶嵌在一块高干扰的窗口(13×13 , $\text{Pd} = 0.91$)里。

2 结果和讨论

根据干扰图(图 1 B, C, D)对景观变化进行定量化分析。为避免影像中云彩的影响,分别选取北部山区的青城,中部川区的夏官营,南部山区的龙泉 3 个无云遮盖的乡镇作为典型区域进行分析。根据图像可知,1995 年到 1999 年的 4a 期间青城、夏官营、龙泉三乡镇社会-生态系统均受到不同程度的干扰,当地景观亦随之发生相应的变化。其中青城有 55.54% 的地区发生变化,夏官营有 28.80% 发生变化,龙泉有 4% 发生变化。由此可见受干扰影响,北部山区景观变化较多,中部的变化较少,而南部山区仅有少量改变。三乡镇的景观变化从整体上直观反映了各自社会-生态系统的干扰水平。

利用移动窗口运算法则计算 Pd 值,可以实现多尺度干扰水平的分析。干扰水平 Pd 的计算可以研究特定时间段内的景观变化,但是无法区分系统的外部压力和系统内部的抗性(抗性, Resistance, 即系统受到干扰时维持其结构和功能的能力),因为变化是二者相互作用的结果。干扰的类型、强度、可预测性、系统内部抗性等都是相互作用的,共同决定了系统状态变化的可能性。这种可能性可以用来表征系统的恢复力^[3]。如果相同的外部压力作用于内部抗性不同的系统,它们会表现出不同的恢复力,而且可以简单地认为社会-生态系统的恢复力是外部压力(例如用土地利用、气候因子等)与内部抗性耦合的结果(例如榆中县社会-生态系统),即恢复力是单位外部压力中抗性的比例。如果认为某一系统可以独立地通过内部抗性维持其状态的话,其恢复力(脆弱度)就可以由干扰水平 Pd 来简单表示。据此在夏官营镇干扰图中随机选取 3 个点,分析

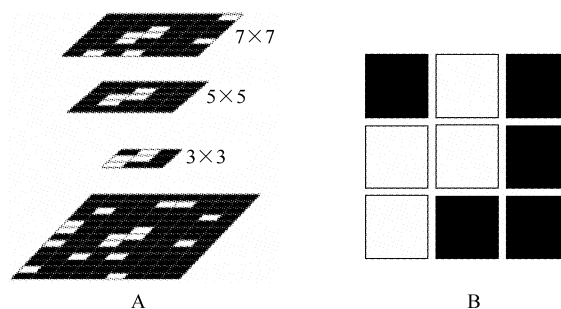


图2 多尺度的移动窗口(A),图中为干扰低的小窗口镶嵌在干扰高的大窗口中和某一栅格 Pd 值的计算方法(B),该 3×3 窗口的 Pd 值为 $5/9$ 或 0.56

Fig.2 Multi-scale moving window(A), the location is less disturbed in a smaller neighborhood and more disturbed in a larger neighborhood; Pd measurement at a certain pixel (location) (B), the Pd of this 3×3 window is 0.56 (Black pixel, White pixel: Idem)

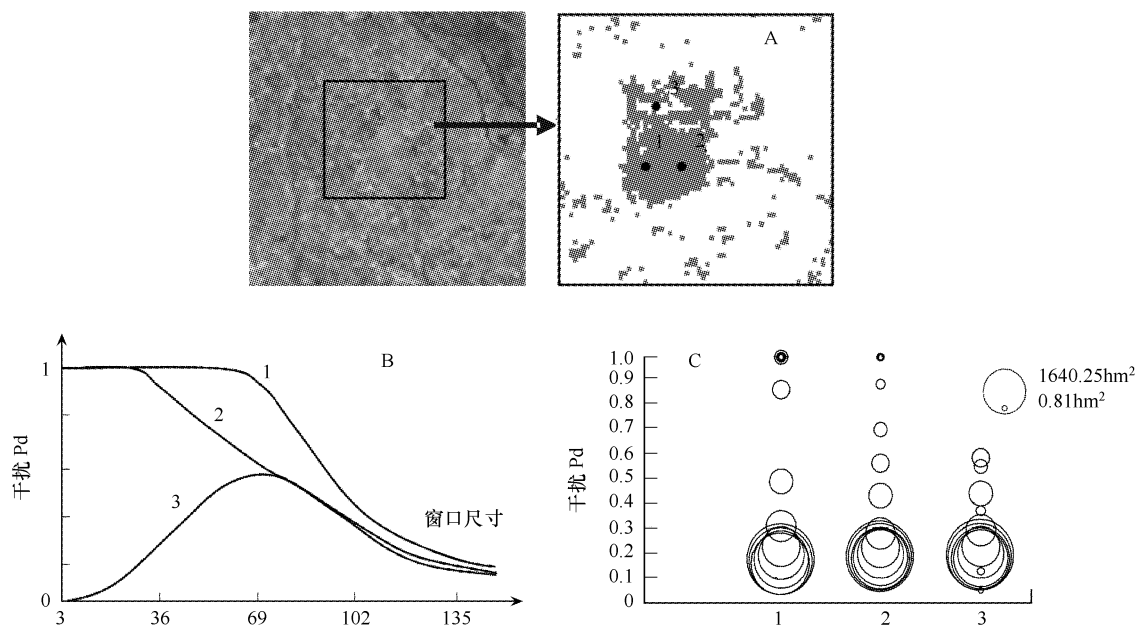


图3 随机点1、2、3位置示意图(A);随机点1、2、3干扰Pd记录折线图(B);随机点1、2、3干扰Pd记录气泡图(C) (使用气泡图可以形象地表征干扰,气泡的大小代表窗口的尺寸,最小0.81hm²至最大1640.25hm²,下同)

Fig. 3 Schematic diagram of random sites (1, 2, 3) (A); Line chart — profile for single locations (1, 2, 3) (B); Bubble chart — profile for single locations (1, 2, 3) (C)

单一位置上的干扰水平(图4)。当窗口为3×3时,点1和点2都处于干扰处(即黑色栅格),所以干扰Pd很高;随着窗口的增大,窗口中非干扰栅格(即白色栅格)比例逐渐变大,Pd值随之变小;最后趋于某一数值,此处为0.2。当窗口为3×3时,点3处于非干扰处,其干扰数值很低;随着窗口尺寸的增加,点3的窗口逐渐包含更多的受干扰栅格(即黑色栅格),其Pd值变大;当窗口继续增大时,Pd值又开始下降;最后在0.2附近波动。点1、2、3的干扰情况是不同的。点1和点2相当于小块高干扰区镶嵌在大块低干扰区内,点2的高干扰区面积小于点1;点3的干扰记录表明其是处于一小块低干扰区内,随着窗口的增大,邻近区域不断被包含入研究区内,干扰是先增加后降低。为了分析乡镇尺度上的干扰水平,在青城、夏官营、龙泉的干扰图中均匀地选取8个点,计算各乡镇的干扰Pd水平(图5)。由图5可知,当窗口的尺寸不断增大时,干扰Pd逐渐趋于某一数值。青城的干扰水平趋于0.5,恢复力低;夏官营的干扰水平在0.2左右波动,恢复力中等;龙泉的干扰水平很低,略大于0,恢复力高。

榆中县社会-生态系统的干扰主要来自干旱(自然变化)和农业耕作(人类活动),这在某种程度降低了干扰的来源和种类,便于干扰的定量化分析。自然条件和人类活动耦合的差异,导致三乡镇恢复力的不同:在1995年至1999年的4a中,青城乡在农耕活动和干旱的作用下有55.54%的景观发生变化,其受干扰水平达到0.5左右。青城乡位于榆中县北部山区,自然条件恶劣,当地系统对干旱的敏感度很大,加之强烈的人类活动,植被变化很大。当然这种变化可能是由于植被快速恢复,从而反映到NDVI数值的极大变化;也可能是植被的退化,NDVI数值的迅速下降。无论干扰的正负,都是对目前系统稳态的一种压力,促使当地社会-生态系统发生稳态转换(Regime shift);中部川区的夏官营,自然条件好,便于开展农耕活动,大部分农田属于灌溉农业,在1995年至1999年4a时间里,当地景观有28.80%发生变化,干扰水平维持在0.2左右,整体运行情况较为平稳;龙泉乡在4a的时间中只有4%的景观发生变化,其受干扰程度接近零。龙泉乡位于南部山区,植被良好,主要为次生林地(常绿阔叶林、针叶林)、高山灌木林和高山草甸区。由于森林的特殊结构,它对干扰有一定的“缓冲”能力,加之当地特殊地形,限制了农耕活动,来自人类的干扰也较小,所以龙泉乡的干扰最低。

3 结语

干扰的量化研究为社会-生态系统恢复力的研究提供了重要思路,干扰水平可以从一个侧面反映系统的运行情况。根据适应性循环理论,当干扰超过社会-生态系统可以承受的阈值时,系统就会进入到新的状态中。干扰有正负之分,正面干扰可能会驱动系统进入理想状态;负面干扰则导致系统进入到非理想的状态中(通常也是较为稳定的状态)而无法回复^[3,19]。一般来说,无论干扰的正负都会改变系统的运行状态,影响系统的稳定性,所以系统管理者都希望通过降低或避免干扰,维持系统当前的运行状态。尺度问题也是恢复力研究的重要方面,因为随着尺度的变大会出现诸如景观格局的简单化,多样性的减少等一系列变化,恢复力的构成要素亦随之改变。包括社会-生态系统在内的各类系统都是在各自尺度上运行的,它们之间不是割裂独立的,不同尺度间的过程是相互影响和作用的,在一定情况下可以发生转化^[20],尺度转换的同时恢复力亦发生改变,所以单一尺度上干扰的研究将很难获得完整准确的认识。本研究利用移动窗口运算法则分析干扰图(图 1 B, C, D),通过变换窗口尺寸在不同空间范围上,即从最小的 3×3 窗口 (0.81hm^2) 到最大的 135×135 窗口 (1640.25hm^2) 对每一个栅格进行分析,实现了干扰水平 Pd 的多尺度分析,进而从更为全面客观的角度理解和研究恢复力。在以后的研究中,可以选择诸如 MODIS 等可获取性好的卫星影像,从更大的时间间隔上分析干扰,亦可以选择时间连续性较好的卫星,对一个地方的干扰进行连续的观察与分析计算。

作为方法论的探讨,本文提出的算法具有普适性,在以后的研究中可根据研究区的具体情况,结合当地土地利用/覆被状况,分析不同地区多尺度上社会-生态系统的干扰水平,评估系统恢复力。总之,干扰的量化研究为构建生态保护网络、增强系统对环境变化(例如:土地覆被变化、生境破碎化)的恢复力、探索可操作性较强的社会-生态系统案例研究模式提供了技术支持和科学依据。

References:

- [1] Zurlini G, Riitters K, Zaccarelli N, Petrosillo I, Jones K B, Rossi L. Disturbance patterns in a socio-ecological system at multiple scales. *Ecological Complexity*, 2006a, 3:119—128.
- [2] Walker B, Salt D. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Washington: Island Press, 2006.
- [3] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington D. C. : Island Press, 2002.
- [4] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecol. Soc.*, 2004, 9 (2), 5.

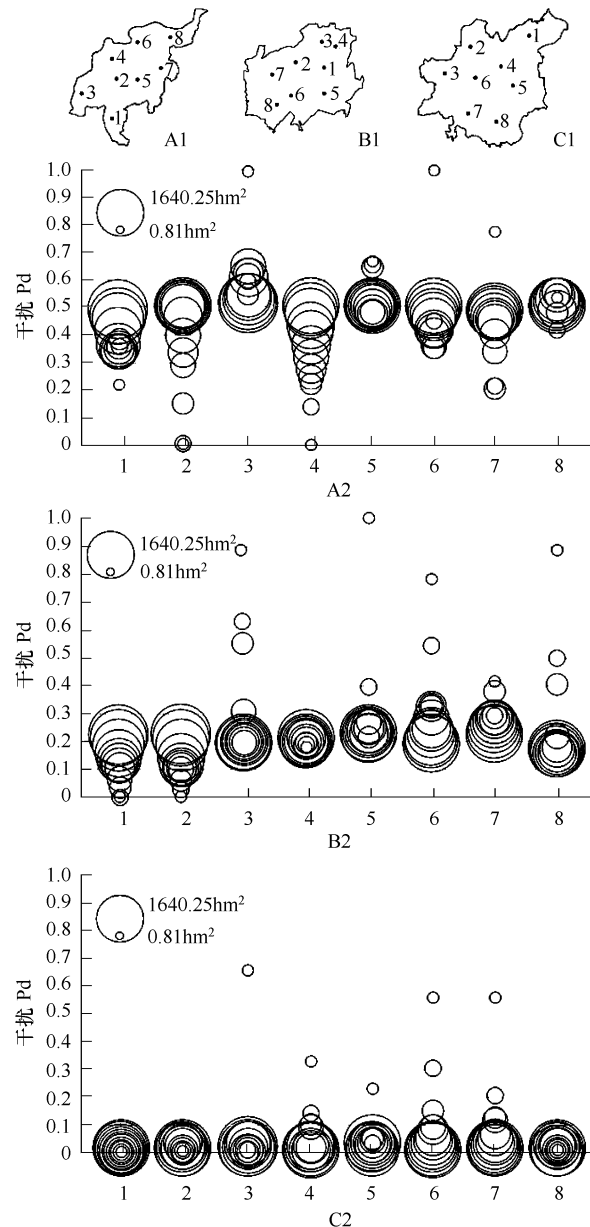


图4 A₁、B₁、C₁是随机点的分布位置,A₂、B₂、C₂为干扰水平 Pd 的气泡图

Fig.4 Random sites A₁, B₁, C₁; Bubble Charts of disturbance Pd in 3 towns A₂, B₂, C₂

- [5] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1—23.
- [6] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4: 390—405.
- [7] Carpenter S R, Walker B, Anderies J M, Abel N. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 2001, 4: 765—781.
- [8] Pickett S T A, White P S. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. USA: Academic Press, 1985.
- [9] Zurlini G, Riitters K, Zaccarelli N, Petrosillo I. Patterns of disturbance at multiple scales in real and simulated landscapes. *Landscape Ecology*, 2007, 22: 705—721.
- [10] Naveh Z, Lieberman A S. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York: Springer-Verlag, 1993. 1, 13.
- [11] Redman C L, Kinzig A P. Resilience of past landscapes: resilience theory, society, and the longue dur e. *Conservation Ecology*, 2003, 7 (1): 14.
- [12] Kerr J T, Ostrovsky M. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends Ecol. Evol.*, 2003, 18, 299—305.
- [13] Goward S N, Markham B, Dye D, Dulaney W, Yang J. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sens. Environ.*, 1991, 35, 257—277.
- [14] Guyot G. Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Collection T l detection Satellitaire. Paradigme*, 1989, 5, 178.
- [15] Zurlini G, Zaccarelli N, Petrosillo I. Indicating retrospective resilience of multi-scale patterns of real habitats in a landscape. *Ecol. Ind.*, 2006b, 6, 184—204.
- [16] Farina A. *Principles and Method in Landscape Ecology*. London: Chapman and Hall, 1998.
- [17] Zaccarelli N, Riitters K H, Petrosillo I, Zurlini G. Indicating disturbance content and context for preserved areas. *Ecol. Indicat*, 2007.
- [18] Riitters K H, Wickham J, O'Neill R V, Jones K B, Smith E R. Global-scale patterns of disturbed fragmentation. *Conserv. Ecol.*, 2000, 4(2), 3.
- [19] Walker B, Carpenter S R, Anderies J, Abel N, Cumming G S, Janssen M, Lebel L, Norberg J, Peterson G D, Pritchard R. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conserv. Ecol.*, 2002, 6(1), 14.
- [20] Richard V S, Bascompte J. *Self-Organization in Complex Ecosystems*. Princeton: Princeton University Press, 2006.