

DOI: 10.5846/stxb201406101203

温晓金, 刘焱序, 杨新军. 恢复力视角下生态型城市植被恢复空间分异及其影响因素——以陕南商洛市为例. 生态学报, 2015, 35(13): 4377-4389.  
Wen X J, Liu Y X, Yang X J. A resilience-based analysis on the spatial heterogeneity of vegetation restoration and its affecting factors in the construction of eco-cities: a case study of Shangluo, Shaanxi. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4377-4389.

# 恢复力视角下生态型城市植被恢复空间分异及其影响因素

——以陕南商洛市为例

温晓金<sup>1,\*</sup>, 刘焱序<sup>2</sup>, 杨新军<sup>1</sup>

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

**摘要:** 植被恢复是建设生态型城市的重要途径, 通过明晰植被恢复空间分异与潜在的植被恢复力, 有助于指导可持续性生态城市的建设。以商洛市为例, 基于 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 数据, 利用 Sen +Mann-Kendall 模型和 Hurst 模型研究 2000—2013 年商洛市植被恢复趋势及未来持续能力, 并采用地理加权回归模型 (GWR) 分析市域尺度内植被恢复空间分布的影响因素。结果表明: (1) 2000—2013 年商洛市的植被恢复效果明显, 植被覆盖增大的区域占总面积的 82.5%, 减小的区域占总面积的 9.4%; (2) 2000—2013 年, 受城镇的距离及土地集约程度等人文因素的影响, 西北部植被恢复略好于东南部。(3) Hurst 指数显示, 商洛市未来植被恢复的持续性不强。48.0% 的区域未来植被覆盖可能会呈现由改善变退化的现象, 而持续增大的区域仅占 36.7%, 植被恢复力仍有待加强。(4) 市域尺度上, 植被恢复趋势空间差异形成的自然因素包括高程、坡度、坡向、与水体的距离, 而人文因素则由距离城镇的距离和土地利用集约度所主导。地理加权回归显示各区县植被恢复趋势的空间影响因素及其强度并不一致, 充分说明人地关系变化对植被恢复作用机理的复杂性。

**关键词:** 商洛市; 植被恢复; 变化趋势; 空间分布; 影响因素

## A resilience-based analysis on the spatial heterogeneity of vegetation restoration and its affecting factors in the construction of eco-cities: a case study of Shangluo, Shaanxi

WEN Xiaojin<sup>1,\*</sup>, LIU Yanxu<sup>2</sup>, YANG Xinjun<sup>1</sup>

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 Ministry Education Key Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** Although China's economy is rapidly growing, its environmental is experience a dramatic degradation simultaneously, so the construction of eco-cities plays a key role in the restoration of environmental sustainability. As an important part of ecological restoration, vegetation restoration is able to prevent water loss, soil erosion and accompanied soil nutrient loss, so it has been widely incorporated into the construction of eco-cities. Therefore, by analyzing the spatial heterogeneity and the potential ability of vegetation restoration, we can formulate a series of measures to analyze the ecological restoration, aiming to promote the construction of eco-cities sustainably. The normalized difference vegetation index (NDVI) was adopted in this analysis, which can reflect the status of vegetation growth and thus has been widely used

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41171127)

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2015-03-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenzhaojin2008@163.com

in the study of vegetation dynamics. In order to understand vegetation resilience to impacts from the socioeconomic and environmental systems and thus to promote the construction of eco-cities, we build up a set of measurements and choose Shangluo in Shaanxi province as our study area. A combination of the statistical tests, including Theil-Sen, Mann-Kendall, and Hurst is calculated to investigate the vegetation dynamics during the restoration period from 2000 to 2013. Then, the geographically weighted regression (GWR) is adopted to analyze the affecting factors that underlying the spatial distribution of vegetation dynamics during the restoration period. The results show that from 2000 to 2013: (1) The vegetation restoration has contributed to the vegetation increase in Shangluo City, as there was a net increase of NDVI value across the entire region. (2) Due to the influences of anthropogenic factors such as the distance to the town and the intensity of land use, the vegetation restoration in northwest of Shangluo is slightly better than the southeast. (3) The Hurst index reveals that the sustainability of vegetation restoration in Shangluo is not consistent in the future, as the positive sustainability accounted for 44.0% of their region. Furthermore, 48.0% of the entire region may experience degradations in the future, and only 36.7% of the region would keep increasing. So it needs to introduce new managements and policies to enhance and monitor the vegetation recovery. (4) The spatial heterogeneity of the vegetation restoration across the entire Shangluo is mainly determined by the natural factors, including elevation, slope, slope-exposure, and distance to water, where the main anthropogenic factors are the intensity of land use and the distance to the town. The affecting factors of vegetation restoration are different among counties with various degrees at the city scale, which reflects that the mechanism on man-land relationship change with the vegetation restoration is complicated. In the social-ecological system, a single index cannot explain the impact factors of vegetation restoration accurately. The analysis of NDVI changes and their driving forces in Shangluo helps to understand the factors in vegetation restoration such as climate, topography, and the policy (such as the Grain to Green Program). The work provide important implications for the policy-makers and relevant stakeholders in the construction of eco-cities.

**Key Words:** Shangluo City; vegetation restoration; change trend; spatial distribution; influence factors

在现阶段,全球生态环境遇到严重挑战,森林的大面积砍伐、水土流失、山体滑坡等自然灾害的现象时有发生,造成大量的物种消亡、经济损失与人员伤亡,植被恢复问题受到越来越多的关注。通过植被恢复,减少水土流失和养分流失,可以有效改善生态环境<sup>[1]</sup>。国内外已通过很多途径进行植被恢复工作,如早在 20 世纪 70 年代 Miyawaki 采用“宫胁法”进行植被恢复,并在多地取得很好的成果<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着中国“天保工程”和“退耕还林还草工程”相继启动,一系列植树造林措施的实施取得了一定的成效,并已被学界证实。如王朗等分析陕北生态脆弱区植被覆盖变化情况,得出陕北植被覆盖呈波动上升趋势,植被恢复良好<sup>[4]</sup>;李国强等以岷江上游干旱河谷为例分析植被恢复对生态安全的影响预测得出植被恢复对保障区域生态安全有积极的效果<sup>[5]</sup>;张继义等研究发现在科尔沁沙地植被恢复过程中物种丰富度达到了较高的水平<sup>[6]</sup>。在植被恢复的度量中,归一化植被指数(NDVI)与植被覆盖量、生长状况、叶面积指数等有比较密切的关系,能够反映地表植被的生长状况,在时空尺度客观反映研究区植被覆盖变化特征<sup>[7-10]</sup>。NDVI 作为目前最为常用的表征植被覆盖状况的指标,通过分析 NDVI 动态变化反映研究区植被恢复状况已在国内外被广泛应用<sup>[11-15]</sup>。

恢复力原指力学上物体受到压迫后恢复到原来状态的能力,在近年来已被广泛应用到其他的领域。在生态-地理过程描述中,恢复力被表征为系统抵抗外界胁迫的能力或遭受扰动恢复的能力<sup>[16]</sup>,并衍生出灾害恢复力<sup>[17-18]</sup>、水资源系统恢复力<sup>[19]</sup>、植物群落的恢复力<sup>[20]</sup>、社会-生态系统恢复力<sup>[21]</sup>等诸多研究前沿。20 世纪以来,全球气候变化所带来的极端天气以及人类对自然界的干扰破坏使生态系统的稳定性受到极大的挑战,特别是对植被覆盖产生的影响尤为突出。在植被恢复的过程中,各种自然条件以及人类活动等都会对生态系统造成一定的干扰,这种干扰因素对植被恢复的稳定性和持续性产生不同作用,影响植被的恢复能力,以至于产生不同的响应,这种响应正是恢复力的有效表征方式。然而目前,以植被恢复为研究对象的生态恢复力研

究实践尚不多见,对植被恢复潜在能力与区域社会-生态系统复合关系的表征值得继续关注。

生态城市产生于 1971 年联合国发起的“人与生物圈”计划,旨在建设一种经济、社会和自然相协调的理想城市模式<sup>[22]</sup>,并已在海外取得相应的实践成果,例如伦敦市的绿地网络、新加坡的花园式生态型城市。在中国经济高速发展而生态环境遭到破坏的背景下,建设生态城市已成为我国大量城市为实现可持续发展的重要载体。生态城市追求人与自然、经济的和谐发展,其中增加城市绿化度是实现高效和谐人地关系的重要因素<sup>[23]</sup>。植被绿地恢复补偿潜在存在巨大的效益<sup>[24]</sup>,对恢复生态系统服务、减缓气候变化都有重大作用<sup>[25]</sup>。同时植被可以保护当地的土壤、水源以及增加种群多样性,还可以丰富娱乐文化<sup>[26]</sup>,为实现生态城市人文与自然和谐发展起到直接的促进作用。目前,中国对于生态城市的建设目标大都限于静态,而植被覆盖度作为生态型城市的生态状况的重要指标,对植被覆盖变化和植被恢复能力的测算可以反映现在及未来的城市生态变化情况。通过识别 NDVI 的变化情况并进行驱动力分析可以正确得出地区气候、地形等因素以及政府退耕还林政策对植被恢复的影响,进而快速做出相应的调配措施,保证生态城市建设中植被恢复工程顺利进行。基于此,本文拟运用 Sen +Mann-Kendall 模型和 Hurst 模型,识别在恢复力背景下商洛市 2000—2013 年植被恢复状况以及植被恢复的持续能力,并利用 GWR 回归模型在市域尺度上明确不同像元之间植被恢复空间分布的影响因素。

## 1 数据准备

### 1.1 研究区概况

商洛市位于陕西省东南部(108°34'20"—111°01'25"E, 33°02'30"—34°24'40"N),地处秦岭山地,面积约 19292 km<sup>2</sup>,人口 243 万人。全市岭谷相间排列,地势西北高,东南低,由西北向东南伸展。地形比较复杂,分为川原、低山、中山三大类,低山区占全区面积的大部分,地貌千沟万壑,纵横交错。其北部气候属于暖温带,南部气候属于亚热带,气候温和,四季分明,年平均气温 7.8—13.9 ℃,年平均降水量为 710—930 mm。商洛市位于秦岭山区,植被覆盖较高,水源涵养比较丰富,生态服务功能显著,近年来为适应生态旅游建设的需要,当地政府不断进行生态保护,并取得了一定的成效<sup>[27]</sup>。同时,该市作为国家南水北调重要水源涵养地,地质环境比较脆弱,灾害时常发生,土地生态安全问题比较严重<sup>[28]</sup>。近年来,商洛市牢固树立生态优先理念,大力实施生态立市战略,推进生态文明建设,生态环境可能有所改善。为衡量生态建设的效果,有必要对全市植被恢复状况以及植被恢复的持续能力作以定量分析。商洛市地理位置与地形条件如图 1 所示。

### 1.2 数据来源与预处理

本研究所需要的 NDVI 数据来源于美国地质调查局(USGS)MODIS 卫星 MOD13Q1 产品,空间分辨率约 250 m,时间分辨率 16 d,时间范围为 2000 年至 2013 年。采用最大值合成法(MVC)将数据合成为年最大 NDVI 影像。DEM 数据源自地理数据云平台,空间分辨率 30 m。土地利用数据解译自 Landsat7 ETM+影像,源自地理数据云平台,空间分辨率 30 m,时间为 2010 年,解译类型包括未利用地、林草用地、耕地、水域、建设用地 5 类。灯光数据取自美国军事气象卫星 DMSP/OLS 传感器提供的稳定夜间灯光数据,空间分辨率 30",时间为 2010 年,灯光栅格像元值在 0—63 之间。图像裁切、统计与出图在 ArcGIS10.2 平台下完成,趋势分析、显著性分析、持续性分析在 Matlab2012a 平台中编程完成。所有出图投影为 Albers 投影,中央经线 105°E,双标准

商洛市在陕西省内的位置

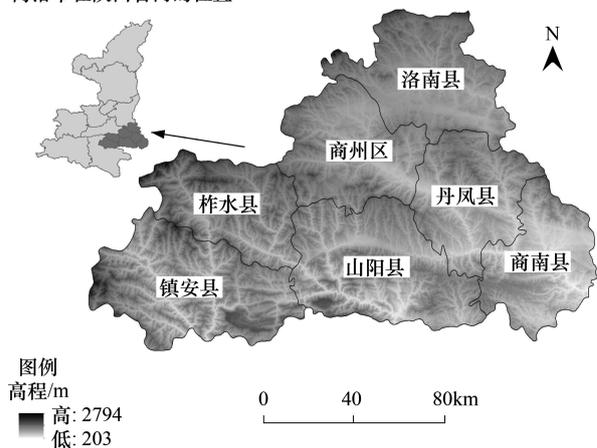


图 1 商洛市位置与地形示意图

Fig.1 The location and terrain of Shangluo City

纬线 25°N、47°N。

## 2 研究方法

### 2.1 NDVI 序列趋势分析

Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 检验法结合可以有效判断长时间序列数据的变化趋势,目前已逐渐运用到植被长时间序列分析中<sup>[29-30]</sup>,该方法对数据的连续性没有严格要求,并可有效规避异常值带来的误差<sup>[31-33]</sup>。

本文用 Theil-Sen 法从像元尺度上对 2000—2013 年商洛市 NDVI 变化趋势进行分析,得到 NDVI 长时间序列的空间分布特征。其计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

式中, $i, j$  为时间序数;  $\text{NDVI}_i, \text{NDVI}_j$  为第  $i, j$  时间序列的 NDVI 值。若  $\beta > 0$  表示 NDVI 呈增长趋势,反之则呈现下降趋势。本研究中,将  $\beta \geq 0.0005$  区域划分为改善区,  $\beta \leq -0.0005$  区域为退化区,  $-0.0005 < \beta < 0.0005$  区域为稳定区。

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,对研究数据分布的正态性没有要求,适于检测非线性趋势<sup>[34-35]</sup>,该检验方法在长时间序列趋势检验和分析中得到广泛应用。计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0, \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0, \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中,  $\text{NDVI}_i$  和  $\text{NDVI}_j$  分别为像元第  $i$  和第  $j$  时间序列的 NDVI 值;  $n$  为时间序列长度;  $\text{sgn}$  为符号函数;  $Z$  的取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ 。在给定置信度水平  $\alpha$  下,当检验结果  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时表示序列存在显著的变化趋势。本文中置信度水平为 0.05。即  $Z < -1.96$  或  $Z > 1.96$  为显著,  $-1.96 < Z < 1.96$  变化不显著。

### 2.2 基于 Hurst 指数的持续性分析

Hurst 指数是定量描述时间序列内长期依赖性的有效方法之一,在水文、地球化学、气候、地质、地震等领域广泛运用<sup>[36]</sup>。

基本原理 对于时间序列的  $\{\text{NDVI}_{(t)}\} t = 1, 2, \dots, n$ , 定义均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}}_{(T)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{NDVI}_{(t)} \quad T = 1, 2, \dots, n$$

$$(1) \text{ 累计离差: } X_{(t,T)} = \sum_{i=1}^t (\text{NDVI}_{(i)} - \overline{\text{NDVI}}_{(T)}), \quad 1 \leq t \leq T \quad (6)$$

$$(2) \text{ 极差: } R_{(T)} = \max_{1 \leq t \leq T} X_{(t,T)} - \min_{1 \leq t \leq T} X_{(t,T)}, \quad T = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$(3) \text{ 标准差: } S_{(T)} = \left[ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\text{NDVI}_{(t)} - \overline{\text{NDVI}}_{(T)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad T = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

求比值  $R_{(T)}/S_{(T)} \cong R/S$ , 若  $R/S \propto T^H$ , 说明在分析的时间序列内存在 Hurst 现象。 $H$  称为 Hurst 指数, 基于  $R/S$  分析, 可以说明在分析的时间序列内是否存在 Hurst 现象。 $H$  称为 Hurst 指数, 若  $0.5 < H < 1$ , 表明时间序列内 NDVI 具有长期相关特征, 过程具有持续性, 越接近 1, 持续性越强; 若  $H = 0.5$ , 说明 NDVI 变化趋势在时间序列内是随机序列; 若  $0 < H < 0.5$ , 表明 NDVI 趋势在时间序列内具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去的变化趋势是相反的,  $H$  越接近于 0, 反持续性越强。

### 2.3 基于 Logistic 回归的驱动力分析

对 NDVI 变化的驱动力识别, 采用普通最小二乘法 (OOLS) 与地理加权回归 (GWR) 两种形式。OLS 模型作为一种全局性模型, 以整体像元的平均值来表示变量与变量之间的关系, 而 GWR 则考虑驱动因子的空间不稳定性, 可以在每一个像元内计算变量与变量之间的关系。

OLS Logistic 回归模型是将研究区细分为栅格单元, 将 NDVI 以二分类变量数据表示。从而利用 Logistic 回归方程求得 NDVI 空间分布与驱动因素的关系:

$$\ln [ P_i / (1 - P) ] = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_n x_{n,i} \quad (9)$$

式中,  $P_i$  为  $i$  位置点 NDVI 的变化趋势线斜率;  $x_{1,i} \sim x_{n,i}$  为 NDVI 变化趋势有关的  $n$  个驱动因子;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  为驱动因子的相关系数,  $\beta$  值越大, 代表相关度越高。

由于空间变量之间存在的空间非稳定性往往是简单的全局模型不能解释的<sup>[37]</sup>, 采用 GWR Logistic 回归对传统的回归模型进行扩展, 使参数可以进行局部估算。其公式如下:

$$\ln \left[ \frac{P_i}{(1 - P)} \right] = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) x_{1,i} + \beta_2(u_i, v_i) x_{2,i} + \dots + \beta_n(u_i, v_i) x_{n,i} \quad (10)$$

$$\beta(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (11)$$

式中,  $(u_i, v_i)$  为  $i$  位置的坐标;  $\beta_n(u_i, v_i)$  表示连续函数  $\beta_n(u, v)$  在  $i$  点的地理加权;  $X$  为驱动因子量化值构成的自变量矩阵;  $Y$  为因变量观测值构成的变量;  $W$  为空间权值矩阵, 本文采用高斯距离权值方法来计算:

$$W(u_i, v_i) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{d_{ij}}{b} \right)^2} \quad (12)$$

式中,  $b$  为基带宽度;  $d_{ij}$  为点  $(u_i, v_j)$  到  $(u_j, v_i)$  的距离。带宽的选择对 GWR 模型的运行结果影响较大, 给定带宽  $b$ , 距离  $d_{ij}$  越大, 距离  $j$  所赋予的权重越小, 离点  $i$  足够远的点的权重会趋于 0。带宽  $b$  选择本文采用最小 AIC 法:

$$A_c = 2n \ln \left( \sigma + n \ln(2\pi) + n \frac{n + \text{tr}(s)}{n - 2 - \text{tr}(s)} \right) \quad (13)$$

式中,  $A$  为 AIC 的值; 下标  $c$  表示“修正后的”估计值;  $n$  是样本的大小;  $\sigma$  是误差项估计的标准离差;  $\text{tr}(s)$  是 GWR 的矩阵  $S$  的轨迹, 是带宽的函数。

## 3 结果分析

### 3.1 NDVI 变化趋势

对商洛市 2000—2013 年 NDVI 进行趋势分析并进行检验。将 Theil-Sen 趋势分析的分级结果与 Mann-Kendall 检验的分级结果进行叠加, 得到像元尺度上的 NDVI 的变化趋势数据 (表 1)、空间变化趋势图 (图 2) 及各区县趋势变化的像元数 (表 2)。

从表 1 中可以看出商洛市 2000—2013 年植被有改善的区域占总面积的 82.5%, 其中显著改善的面积占 30.0%; 植被退化的区域占总面积的 9.4%, 显著减小的面积占 1.8%; 植被覆盖平缓波动的面积占 9.1%。说明近 14 年间, 商洛市植被恢复情况较好, 局部的生态退化不影响生态恢复的大趋势, 这可能与商洛市政府加大力度进行生态文明建设以及局部山区农用地撂荒有关。

表 1 2000—2013 年商洛市 NDVI 变化趋势统计

Table 1 Statistics of NDVI Trend in Shangluo City during 2000—2013

| $\beta$                    | Z                  | NDVI 趋势变化类型<br>The type of NDVI trend variation | 像元数<br>Pixel number | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 面积百分比/%<br>Percentage |
|----------------------------|--------------------|---|---------------------|----------------------------|-----------------------|
| $\geq 0.0005$              | $Z \geq 1.96$      | 显著增大  | 102343              | 5886.9                     | 30.0                  |
| $\geq 0.0005$              | $-1.96 < Z < 1.96$ | 增大  | 178690              | 10204.0                    | 52.5                  |
| $-0.0005 < \beta < 0.0005$ | $-1.96 < Z < 1.96$ | 平缓波动  | 30831               | 1766.1                     | 9.1                   |
| $\leq -0.0005$             | $-1.96 < Z < 1.96$ | 减小  | 26095               | 1569.9                     | 7.6                   |
| $\leq -0.0005$             | $Z \leq -1.96$     | 显著减小  | 2742                | 196.2                      | 1.8                   |

表 2 各区县 NDVI 趋势变化像元数统计

Table 2 The pixel number statistics of NDVI Trend in all counties

| 趋势变化类型<br>The type of trend variation | 西北四县<br>The four counties in Northwest |       |       |       | 总和<br>Sum | 比例/%<br>Percentage | 东南三县<br>The three counties in Southeast |       |       | 和<br>Sum | 比例/%<br>Percentage |
|---------------------------------------|--|-------|-------|-------|-----------|--------------------|---|-------|-------|----------|--------------------|
|                                       | 洛南县                                    | 商州区   | 镇安县   | 柞水县   |           |                    | 山阳县                                     | 丹凤县   | 商南县   |          |                    |
| 显著减小 Significantly decrease           | 720                                    | 981   | 88    | 160   | 1949      | 1.0                | 171                                     | 314   | 306   | 791      | 0.5                |
| 显著增大 Significantly increase           | 13041                                  | 13923 | 21041 | 15118 | 63123     | 32.0               | 22439                                   | 7565  | 9110  | 39114    | 27.4               |
| 减小 Decrease                           | 5422                                   | 3401  | 3596  | 2273  | 14692     | 7.5                | 2788                                    | 4845  | 3630  | 11263    | 7.9                |
| 增大 Increase                           | 26375                                  | 24691 | 29926 | 18777 | 99769     | 50.6               | 31850                                   | 23974 | 22811 | 78635    | 55.0               |
| 平缓波动 Gently fluctuate                 | 3783                                   | 3235  | 6301  | 4278  | 17597     | 8.9                | 3891                                    | 5106  | 4087  | 13084    | 9.2                |

从图 2 中可以看出商洛市的植被恢复比较明显,植被覆盖增大的区域远超过减小的区域,所有区县植被覆盖增大面积均大于减小面积。表 2 中可见西北部 NDVI 呈增加趋势的像元数占 82.6%,其中呈显著增大趋势的占 32.0%,东南部 NDVI 呈增加趋势的像元数占 82.4%,其中呈显著增大趋势的占 27.4%。说明商洛市西北部植被恢复略好于东南部,显著增大的区域主要分布在洛南县中东部,商州区中部部分区域,柞水县中东部,镇安县中东部,山阳县西部和中部部分区域,丹凤县和商南县小部分区域。植被覆盖减小的区域与平缓波动的区域相互交错,主要分布在商洛市区县周边与其他省市交界的地区以及交通干道周围。西北部和东南部 NDVI 呈减小趋势的像元数所占的比例相差不大,分别为 8.4%、8.4%,但是呈显著减小趋势的像元数西北部比东南部略大,分别为 1.0%、0.5%,主要分布在沪陕高速和榆商高速通过的地区,充分表明交通道路的铺设可以影响植被覆盖度的降低,对生态环境有不利的影

### 3.2 持续性分析

计算商洛市植被 NDVI 值 Hurst 指数,其平均值为 0.488,其中 Hurst 值小于 0.5 的像元数占 56.0%,说明商洛市植被恢复的反向持续性略强于持续性。将 Hurst 指数在空间上表示(图 3),Hurst 指数低于 0.5 和高于 0.5 的区域相互交错;呈正向持续趋势特点的值在全市范围内分布比较分散;反向趋势特点的值则在洛南县中部以及横穿镇安县、山阳县、丹凤县的东西条带上分布量相对较大,说明这些地区植被覆盖未来的变化趋势与过去相反。

为揭示商洛市植被恢复的未来变化趋势,将 Hurst 指数空间格局与植被覆盖变化趋势相叠加,将正向持

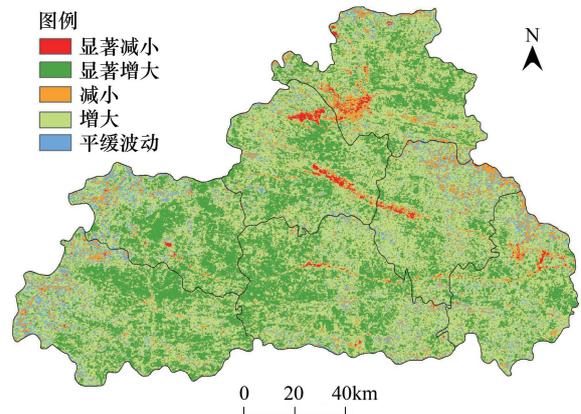


图 2 2000—2013 年商洛市植被覆盖变化趋势

Fig. 2 Trends of vegetation change in Shangluo City during 2000—2013

续性与变化趋势的组合分为持续性显著增大、持续性显著减小、持续性增大、持续性减小、持续性波动 5 类;而反向持续性是表示未来变化趋势与之前变化趋势相反,本文将反向持续性与变化趋势的组合定为由退化变改善和由改善变退化两类,从而得到商洛市植被恢复未来趋势图(图 4)。全市范围内植被覆盖由改善变退化的范围比较大,面积有 9474.0 km<sup>2</sup>, 占总面积的 48.0%,各个县区的未来退化现象都比较严重;未来呈持续性显著减小现象的区域主要分布在沪陕高速和榆商高速附近部分地段,面积有 74.6 km<sup>2</sup>, 占总面积的 0.4%,说明交通干道附近的生态会持续性的退化;植被覆盖持续性显著增大和显著增大的面积分别为 2555.3 km<sup>2</sup>和 4457.3 km<sup>2</sup>,两种变化趋势的面积占总面积的 36.7%,在柞水县、镇安县、山阳县分布较多,其他区县则零星分布;有退化变改善的区域面积较小,有 1.93 km<sup>2</sup>, 仅占总面积的 2.0%,主要分布在洛南县与商州区交界中部区域;持续性波动的区域主要分布在丹凤县东北边缘地区和镇安县、柞水县西北边缘地区以及其他区县的零星个别地区,总面积 1775.5 km<sup>2</sup>, 占总面积的 9.3%。

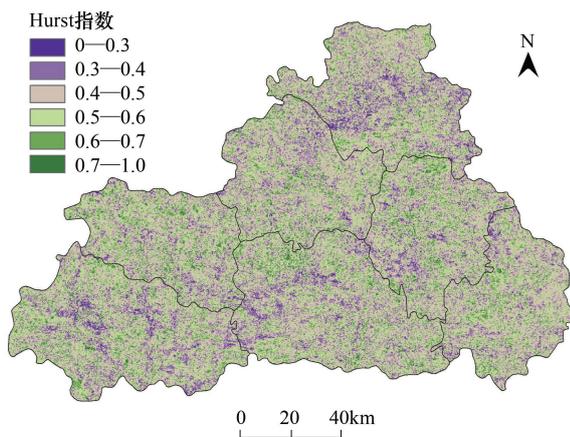


图 3 商洛市植被 Hurst 指数

Fig.3 Hurst index of vegetation in Shangluo City

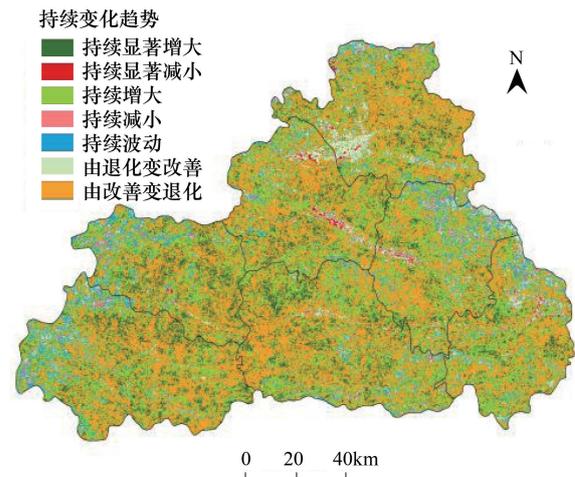


图 4 商洛市植被覆盖未来变化趋势

Fig.4 The future trend of vegetation cover change in Shangluo City

对比图 2 与图 4,可以发现虽然商洛市近 14 年的植被恢复相对较好,但这种状态可能不能持续进行。这说明商洛市植被恢复的持续性不佳,恢复力可能较差。这可能是由于研究区为土石山区,土质较薄,土壤养分不足,植被生长受到限制。另外退耕还林工程的暂时停止,当地农户的优惠政策也逐渐消失,迫于生计压力,退耕地有重新复垦的可能,从而造成植被恢复工作不能持续性进行。因而,需要当地相关部门进行政策调配,在重启退耕还林政策之前对农户制定其他优惠政策,促进农户积极持续参与植被恢复工作,从而保证植被恢复成果的保持和继续。

表 3 商洛市植被恢复未来变化趋势面积及百分比

Table 3 The future area and proportion of vegetation change trend in Shangluo City

| 未来变化趋势<br>Future variation trend         | 像元数<br>Pixel number | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 百分比/%<br>Percentage |
|--|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 持续显著增大 Continuous significantly increase | 44335               | 2555.3                     | 13.4                |
| 持续显著减小 Continuous significantly decrease | 1295                | 74.6                       | 0.4                 |
| 持续增大 Continuous increase                 | 77337               | 4457.3                     | 23.3                |
| 持续减小 Continuous decrease                 | 11970               | 689.9                      | 3.6                 |
| 持续波动 Continuous fluctuate                | 30805               | 1775.5                     | 9.3                 |
| 由退化变改善 Degraded to improved              | 6566                | 378.4                      | 2.0                 |
| 由改善变退化 Improved to degraded              | 159173              | 9474.0                     | 48.0                |

### 3.3 空间变化影响因素分析

#### 3.3.1 影响因素选取

在宏观尺度上,植被覆盖受降水、温度等气候因素影响,随着社会的发展,人类活动因素对植被覆盖的影响逐渐被重视<sup>[38]</sup>。全球变暖的大背景无疑是导致区域植被全面恢复的直接原因,而商洛市地处秦岭山区,降水量丰富,气温在市域内波动幅度有限,很难认为气温降水在水平空间的分异性会导致植被变化速度的空间差异。而气温降水的垂直分异则会在高程、坡向等地形因素上得到体现。因此本研究降水、气温等气候因子作为背景值,对植被恢复趋势产生空间变化,选取高程、坡度、坡向、水体距离 4 个自然要素以及土地集约、城镇距离、灯光 3 个人文要素共 7 个要素引用到 OLS Logistic 回归与 GWR Logistic 回归模型中,分析对商洛市县域之间植被覆盖趋势空间分布的影响。

由于坡向与土地集约两个因子并不是定量数据源,因此有必要人为赋值。在对坡向因子赋值中,根据多数植被向阳生长的规律人为将方向南赋为 1,东南、西南为 2,东、西为 3,东北、西北为 4,北为 5;对土地利用度的归一化中,参照王思远等的研究将不同耕地类型分别赋值<sup>[39]</sup>,将未利用地赋为 1,生态用地(林地、草地、水域)为 2,农业用地(耕地)为 3,建设用地赋为 4。为使最后的回归系数具有可比性,将所有影响因素的值进行正向归一化。为减小部分极值像元导致的误差,默认坡度大于 45°、高度大于 1800 m、灯光像元值大于 56、距离水体和城镇 10 km 以上的栅格像元直接赋值为 1。所有因子归一化的结果如图 5 所示。

#### 3.3.2 OLS 模型与 GWR 模型对比分析

由于呈下降趋势的像元只占总像元的 9.4%,且分布不连续,因此对呈上升趋势的像元做回归分析。鉴于不同遥感图像分辨率并不一致,如果直接统一在一个分辨率,会导致不同变化趋势的像元相互抵消,得出错误结果。因而,本文从呈上升趋势的像元中随机采样 10000 个点,直接提取该点所对应的空间影响因素像元,以减小转换 NDVI 变化趋势图分辨率所导致的较大误差。将影响因素归一化值与 NDVI 的变化趋势值分别进行 OLS Logistic 回归与 GWR Logistic 回归分析,得出两种回归分析结果(表 4)。

表 4 普通最小二乘法(ordinary least squares regression)与地理加权回归(geographically weighted regression)结果对比

Table 4 Comparison of ordinary least squares regression and geographically weighted regression's results

| 回归模型<br>Regression model | AIC 值<br>AIC value | $R^2$ | 修正 $R^2$<br>The modified $R^2$ | Residual <sup>2</sup> | Sigma <sup>2</sup> |
|--------------------------|--------------------|-------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|
| OLS                      | -887.40            | 0.06  | 0.06                           | 534.92                | 0.054              |
| GWR                      | -2664.94           | 0.23  | 0.22                           | 436.82                | 0.044              |

通过表 4 中两种模型的分析结果可以看出,用 GWR 模型比 OLS 模型得出的 AIC 值降低了 1777.54,计量效果有比较明显的改善<sup>[40]</sup>。另外,GWR 模型比 OLS 模型计算的 Residual<sup>2</sup>和 Sigma<sup>2</sup>明显降低,而决定系数  $R^2$ 跟修正  $R^2$ 明显变高。可见,用 GWR 模型对商洛市植被恢复空间变化影响因素分析,比 OLS 模型更有优势。OLS 模型模拟影响因素与全局要素的关系,而植被覆盖在研究尺度较小的空间范围内可以呈现不同的分布格局,利用 OLS 模型分析植被空间分布的影响因素会造成效果不明显。而 GWR 模型作为一种局域模型,可以在每一个像元内分析变量和变量的关系,可以补充 OLS 模型的不足。通过 OLS 模型计算得出变化趋势与各相关因子显著性水平得出,植被恢复变化趋势与高程因子、坡向因子、距离水体的距离、土地集约度、与城镇的距离的显著性  $P$  都接近于 0,与坡度因子的  $P$  值为 0.012,与灯光因子的  $P$  值为 0.507,这说明除灯光因子以外,所选取的空间影响因素与植被恢复变化趋势的相关性显著性较高,通过两种模型对植被恢复趋势与影响因素的回归分析结果比较,GWR 模型得出的结果比 OLS 模型得出的结果拟合性明显加强,这可以反映出利用 GWR 模型得出的相关性显著性比 OLS 模型更为明显。因而,利用 GWR 模型进行分析,结果具有可信性。

#### 3.3.3 植被恢复趋势空间分布影响因素分析

用 GWR 模型模拟商洛市植被恢复趋势空间变化与高程、坡度、坡向、水体距离、土地集约、距离城镇的距离和灯光 7 个影响因素的相互作用,根据每个区县的回归系数,分析不同影响因素对植被恢复趋势的影响

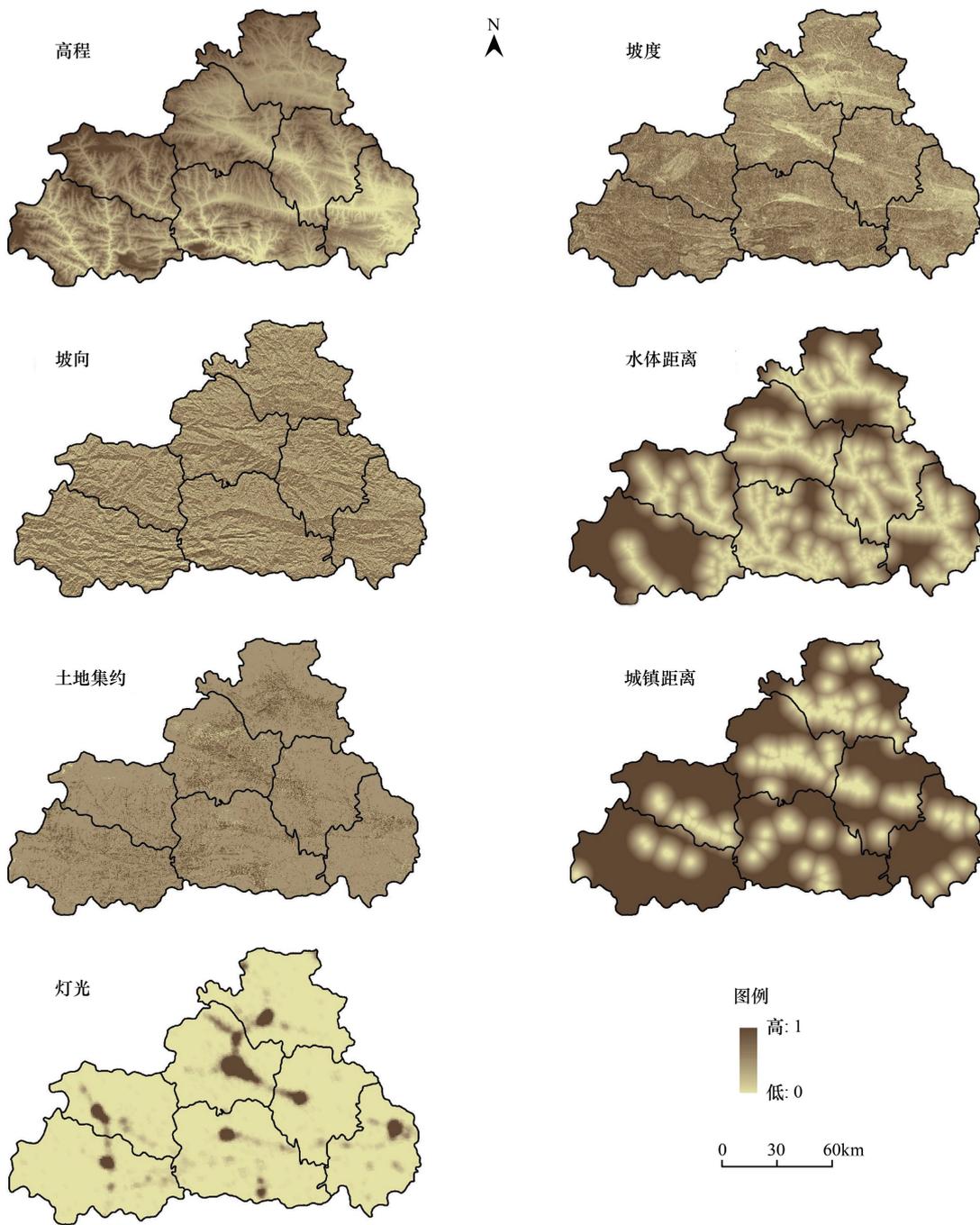


图 5 商洛市植被覆盖影响因素  
 Fig.5 Influencing factors of vegetation coverage in Shangluo City

程度。

(1) 高程与植被恢复趋势的回归结果显示,高程与植被恢复大多呈现为负相关(图 6)。表明在商洛市的大部分区域,高程越大,植被恢复趋势越小。其中负向影响最为敏感的地区为洛南县,并向东南部方向,负向效应逐渐减弱。回归分析充分说明高程因子是植被恢复的影响因素。因而受地势的负向影响,高程相对较高的地区更应该加强管理措施,促进植被恢复,加快生态建设。

(2) 坡度与植被恢复趋势的回归系数在总体上由西南向东北方向逐渐增大(图 6)。对比商洛市的坡度因素分布可以看出,坡度对植被恢复趋势的影响分布与坡度分布呈现一致性,说明坡度因子是影响植被恢复

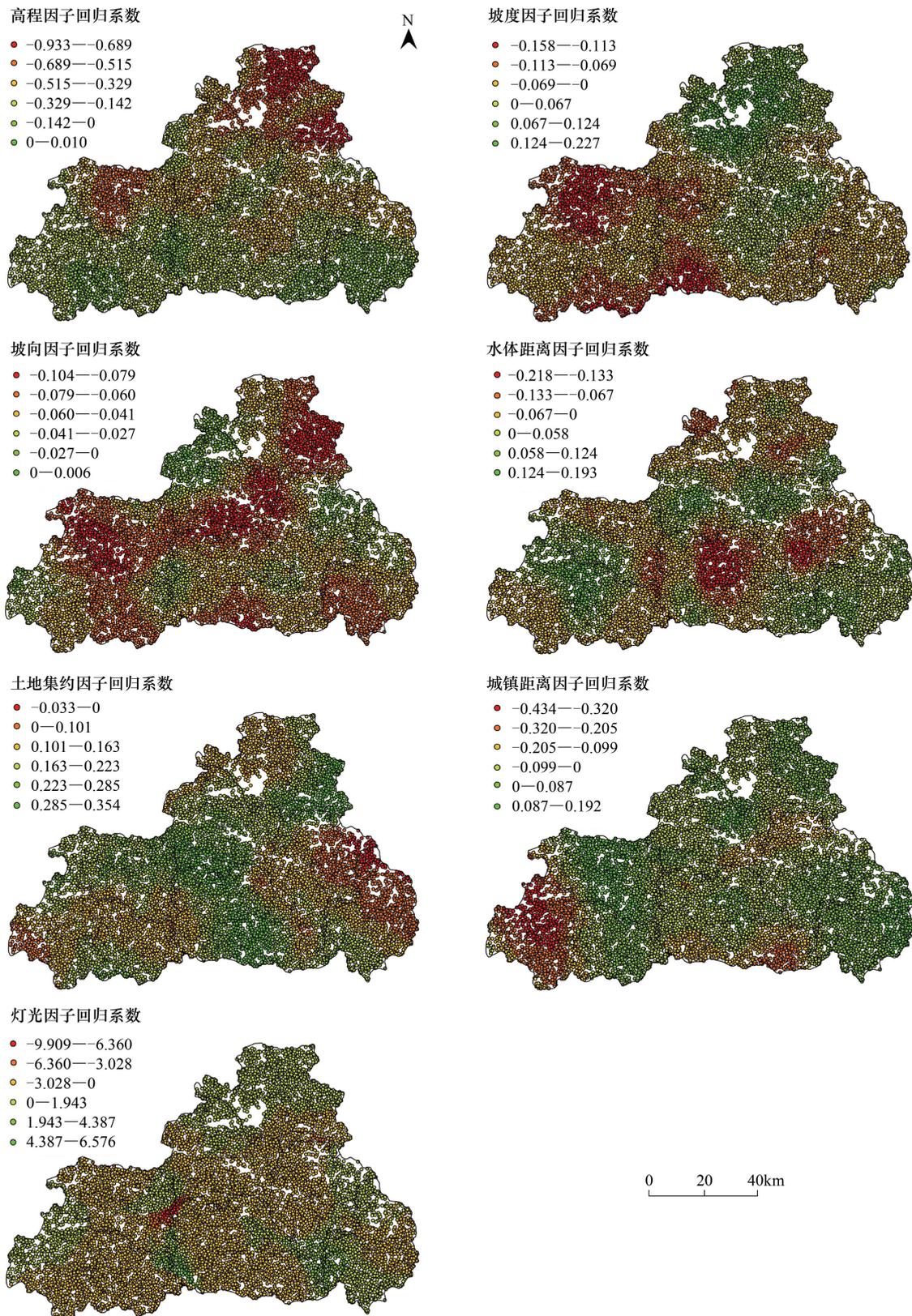


图6 商洛市各影响因素与植被恢复趋势回归系数分布图

Fig.6 Coefficient distribution of the factors for the vegetation restoration in Shangluo City

趋势的重要驱动因素。从相关性看,坡度对镇安县、柞水县、山阳县的负向影响最大,植被恢复随坡度的增大而减小,而呈正相关性的地区则主要分布在商州区西北区域、洛南县的大部分区域以及丹凤县的中部。

(3)坡向与植被恢复趋势的回归结果表明坡向对植被恢复趋势基本上呈负相关性(图6)。坡向值越大,恢复趋势越差,说明北坡的植被恢复趋势较南坡较差,这与植被的生长习性有关,由于绿色植被的向阳性,南面植被比北面植被生长较好。从空间差异看,坡向对商洛市植被恢复的相关性呈现西北部较大,东南部较小的现象。

(4)水体距离与植被恢复趋势的回归结果得出呈负相关的区域面积大于正相关的区域面积(图6)。通过对比水体距离空间分布与回归系数空间分布,整体范围内商洛市植被恢复趋势不随水体距离变化产生对应性变化。这种结果是由于商洛市大部分地处年降水量大于800mm的湿润区,植被依靠自然条件可得到较好恢复,因而在较大的研究尺度上,水体距离并不是制约植被恢复的影响因子。但是水体距离对植被恢复趋势产生空间上的差异,大部分地区水体距离与植被恢复趋势呈负向效应,即离水体距离越远,植被恢复趋势越小。这表明在较小的研究尺度上,水体对植被恢复的影响较大,距离水体较近的地方便于植被根系吸收水分以及人们的灌溉,利于植被生长。

(5)土地集约因子与植被恢复趋势的回归系数绝大部分地区值为正,只有极少值为负(图6)。这说明土地集约度与植被恢复趋势之间的关系较大,土地利用集约度越大的地区,植被反而会呈现恢复,这与人类活动导致植被退化的观点有所差异。具体到本研究区,城镇用地与未利用地面积相对有限,土地利用度的差异主要是林草用地与耕地间的差别。随着退耕还林工程与农户撂荒现象的发生,事实上耕地的耕作强度并没有增大,而是可能在耕地中混合了更多杂草等自然植被。在混合像元中,经常难以将自然植被与耕地的交错区域分离出来,因而遥感解译的土地集约性相对而言比较稳定。因而,极有可能出现耕地区域的植被恢复速度要大于山区成熟林区的植被恢复,出现土地集约度与植被恢复的正相关。

(6)城镇距离与植被恢复趋势回归系数正值大于负值,城镇距离与植被恢复趋势的相关性西北部略好于东南部(图6)。这表明城镇距离也是影响植被恢复趋势的重要因素,城镇距离与植被恢复趋势呈正向效应说明城镇距离越大,植被恢复的能力越强。这进一步揭示人类活动对植被恢复力的影响作用。农村耕地撂荒与退耕还林可能有利于植被恢复,但城镇化区域的人类活动并不利于植被恢复。

另外,灯光指数是由通过卫星传感器DMSP/OLS采集夜间灯光、火光等产生的辐射信号探测区别于黑暗乡村背景的城市灯光以及居民地和车流灯光<sup>[41]</sup>。因而灯光指数可以表征城市化的强度并被证明反映中国大陆发展情况具有可信度<sup>[42-44]</sup>。因而,本文运用灯光指数因子分析其对市域尺度上植被恢复趋势空间分布的影响(图6)。灯光因子与植被恢复大范围的负相关性可以说明人类活动限制了植被的恢复力。但是从空间小尺度上看,灯光因子对植被恢复趋势的影响在空间上不明显,显著性 $P$ 值也较低。因此可以认为灯光因子不是造成商洛市植被恢复空间分布的影响因子。这也证实了土地集约度与城镇距离所阐述的人类活动因素与植被恢复的复杂作用机理,不能简单认为人类活动会对植被恢复造成正向或负向影响,空间化的人类活动强度不能与植被恢复速度直接相关。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于Sen+Mann-Kendall模型分析商洛市2000—2013年植被恢复趋势,并利用Hurst指数与GWR模型分析未来植被恢复的持续性及变化趋势空间分布的影响因素,主要结论包括:

(1)2000—2013年间商洛市的植被恢复效果明显,植被覆盖增大的区域占总面积的82.5%,减小的区域占总面积的9.4%,说明14年间研究区生态恢复工程取得了较大的成果。

(2)研究区植被恢复状况在空间上呈现差异性,西北部NDVI呈增加趋势和显著增大趋势的像元数分别占82.6%和32.0%,东南部分别占82.4%和27.4%,西北部恢复状况略好于东南部。其中植被覆盖显著减小的

区域分布在沪陕高速和榆商高速通过的地带,说明交通道路的建设会对植被恢复产生不利影响。

(3) 基于 Hurst 指数表明,商洛市未来植被恢复的持续性不强,仅有 44.0% 的区域未来呈正向持续现象。通过 Hurst 指数与植被恢复趋势的叠加进行分析,结果显示:有 48.0% 的区域未来植被覆盖呈现由改善变退化的现象,而持续增大的区域仅占 36.7%,未来商洛市植被恢复的持续能力较差。说明研究区还需进一步生态工程强化措施增强植被恢复能力。

(4) GWR 模型回归结果表明,造成植被恢复趋势县域之间空间差异较大的自然因素主要有高程、坡度、坡向、距离水体的距离,人文因素主要是与城镇的距离、土地集约度。灯光因子对植被恢复趋势有负相关性,但作用并不显著。在市域尺度上各区县植被恢复趋势的空间影响因素及其强度并不一致,体现了社会-生态系统中人地关系变化对植被恢复作用机理的复杂性,单一的空间指标难以准确解释植被恢复的影响和变化。

## 4.2 讨论

恢复力是系统在承受外来干扰时保持系统本身的功能、结构和反馈的能力。本文将植被恢复的持续能力作为一种恢复力的测度,从像元尺度上对植被恢复力进行评价,有利于在更高的空间精度内分析恢复力的变化,达成了时空定量化分析植被恢复力的目标。本研究得出 2000—2013 年商洛市植被恢复趋势比较明显,与通过遥感监测陕西省重点生态建设工程区 2000 年后植被恢复得出的商洛市植被覆盖率增加的研究结果一致<sup>[45]</sup>,说明研究区的生态建设的确取得了一定的成果。同时,研究发现大部分地区的未来植被覆盖呈现由改善变退化变化趋势,说明植被恢复力与植被恢复是两个不同的概念,商洛市现阶段植被恢复良好,并不意味着其恢复力很强。随着经济社会的发展,人类活动变的越来越剧烈,城市的扩张等干扰因素的增加,使生态系统承受这种扰动的能力降低,导致植被恢复能力的降低,植被恢复的持续能力变差。因此,在实施退耕还林加强植被恢复的同时还应考虑其他干扰植被恢复的因素,制定应对措施,增强植被恢复的正向持续性。

社会-生态系统是人与自然紧密联系的复杂的适应系统,其恢复力是系统能够保持系统结构、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的大小<sup>[21]</sup>,而社会-生态系统干扰因子的复杂性使植被恢复力的驱动机理的分析难度加大。随着人类活动的加强,越来越多的社会驱动因子不断对植被恢复进行干预,对植被恢复空间分布产生不同的影响。从较大尺度上看,城市的扩张会大量占用农用地、破坏植被覆盖,对植被恢复有不利影响,但其在较小尺度上对不同地区植被恢复的影响却不尽相同。随着城市化的加剧,山区大量劳动力向城市转移,造成大量的耕地可能被撂荒,可能出现山区植被恢复的现象;而城市一般沿河谷地带扩张,建设用地的增加使这些地区的植被覆盖度降低,出现生态退化的现象。由于商洛市各区县自然本底和人文因素的发展程度不同,两者之间的作用机理也有所不同,造成了植被恢复的空间差异。在更细致的分析中,应从微观尺度上具体调查农户个体行为对植被恢复可能的影响因素,这需要在后续的研究中以重点区域实地调研、访谈,进一步分析植被恢复的多尺度驱动机制并拟定可行性政策以保证生态恢复工程持续顺利实施。

**致谢:**感谢密歇根州立大学孙晶博士对写作的帮助。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [ 2 ] Miyawaki A. *Vegetation Ecology and Creation of New Environments*. Tokai: Tokai University Press, 1987: 357-376.
- [ 3 ] Miyawaki A. *Green Environments and Vegetation Science Chinjuno-Mori to World Forests*. Tokyo: NIT Publisher, 1997: 239.
- [ 4 ] 王朗,傅伯杰,吕一河,曾源. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2109-2116.
- [ 5 ] 李国强,马克明,傅伯杰. 区域植被恢复对生态安全的影响预测——以岷江上游干旱河谷为例. *生态学报*, 2006, 26(12): 4127-4134.
- [ 6 ] 张继义,赵哈林,张铜会,赵学勇. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 86-92.
- [ 7 ] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [ 8 ] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.

- [ 9 ] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35(2/3): 161-173.
- [ 10 ] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [ 11 ] Sun Z D, Chang N B, Opp C, Hennig T. Evaluation of ecological restoration through vegetation patterns in the lower Tarim River, China with MODIS NDVI data. *Ecological Informatics*, 2011, 6(2): 156-163.
- [ 12 ] Wu Z T, Wu J J, Liu J H, He B, Lei T J, Wang Q F. Increasing terrestrial vegetation activity of ecological restoration program in the Beijing-Tianjin Sand Source Region of China. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 37-50.
- [ 13 ] 覃云斌, 信忠保, 易扬, 杨梦婵. 京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关系. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 196-204.
- [ 14 ] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.
- [ 15 ] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 380-386.
- [ 16 ] 高江波, 赵志强, 李双成. 基于地理信息系统的青藏铁路穿越区生态系统恢复力评价. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2473-2479.
- [ 17 ] 刘婧, 方伟华, 葛怡, 王静爱, 芦星月, 史培军. 区域水灾恢复力及水灾风险管理研究——以湖南省洞庭湖区为例. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 56-61.
- [ 18 ] 宛文博, 葛怡, 毕军, 史培军. 灾害恢复力研究进展——基于文献调查的分析. *自然灾害学报*, 2010, 19(4): 17-22.
- [ 19 ] 于翠松. 山西省水资源系统恢复力定量评价研究. *水文*, 2008, 28(2): 13-17.
- [ 20 ] 党承林, 王崇云, 王宝荣, 李彦玲, 黄其明. 植物群落的演替与稳定性. *生态学杂志*, 2002, 21(2): 30-35.
- [ 21 ] 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): 5371-5381.
- [ 22 ] 王如松. 高效·和谐: 城市生态调控原则和方法. 长沙: 湖南教育出版社, 1988.
- [ 23 ] 董宪军. 生态城市论. 北京: 中国社会科学出版社, 2002.
- [ 24 ] Konijnendijk C C. *The Forest and the City: The Cultural Landscape of Urban Woodland*. Berlin: Springer Science, 2008.
- [ 25 ] Leonie S, Mcalpine C A, Bowen M E. Restore, repair or reinvent: Options for sustainable landscapes in a changing climate. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 407-410.
- [ 26 ] Soares A L, Rego F C, McPherson E G, Simpson J R, Peper P J, Xiao Q. Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2011, 10: 69-78.
- [ 27 ] 刘焱序, 李春越, 任志远, 文雯. 基于 LUCC 的生态型城市土地生态敏感性评价. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 125-130.
- [ 28 ] 孙丕苓, 杨海娟, 刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究——以陕西省商洛市为例. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1520-1530.
- [ 29 ] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1/4): 107-122.
- [ 30 ] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [ 31 ] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Nederlandse Akademie Wetenschappen Series A*, 1950, 53: 386-392.
- [ 32 ] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [ 33 ] Hoaglin D C, Mosteller F, Tukey J W. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. New York: Wiley, 2000: 169-181.
- [ 34 ] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [ 35 ] Kendall M G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1970.
- [ 36 ] 江田汉, 邓蓬堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- [ 37 ] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [ 38 ] 周洪建, 王静爱, 岳耀杰, 李睿. 人类活动对植被退化/恢复影响的空间格局——以陕西省为例. *生态学报*, 2009, 29(9): 4847-4856.
- [ 39 ] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. *地理学报*, 2001, 56(6): 631-639.
- [ 40 ] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
- [ 41 ] 陈晋, 卓莉, 史培军, 一之濑俊明. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168-175.
- [ 42 ] 卓莉, 史培军, 陈晋, 一之濑俊明. 20 世纪 90 年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨. *地理学报*, 2003, 58(6): 893-902.
- [ 43 ] 杨眉, 王世新, 周艺, 王丽涛. DMSP/OLS 夜间灯光数据应用研究综述. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1): 46-51.
- [ 44 ] 何春阳, 史培军, 李景刚, 陈晋, 潘耀忠, 李京, 卓莉, 一之濑俊明. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究. *科学通报*, 2006, 51(7): 856-861.
- [ 45 ] 范建忠, 李登科, 董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 228-234.