

# 耦合恢复力的林区土地生态适宜性评价 ——以吉林省汪清县为例

刘焱序, 王仰麟, 彭建, 魏海, 宋治清, 张小飞

(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:** 本研究试图将植被变化与恢复能力纳入林区土地生态适宜性评价中, 从空间动态的角度对典型林业县土地生境进行生态适宜性评价; 并综合应用人工神经网络、趋势分析与偏相关分析、R/S 分析等手段, 分别进行生境质量评价、植被变化与驱动分析、趋势可持续性判断。基于流域单元的评价结果良好展示了研究区土地生态适宜性分异, 即自然生境本底条件较差、人类活动强度较大的低适宜区域, 和有较好生态本底条件、可持续生态恢复能力的高适宜区域。在研究整体概念框架上, 本研究提出将判定持续性的Hurst指数作为恢复力的空间表达手段, 可以有效对具体区域林业管理进行实际应用; 在具体方法上, 研究所采用的SOFM神经网络聚类、Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验等数理计量手段可以有效降低主观评价导致的不确定性。

**关键词:** 土地生态适宜性; 恢复力; 生境质量; 偏相关; Hurst指数

DOI: 10.11821/dlxb201503010

## 1 引言

土地适宜性评价是评定土地对于某种用途是否适宜以及适宜的程度, 其中为农林牧业服务的土地评价一直是中国土地评价研究的传统和主流<sup>[1]</sup>。近年来, 土地适宜性评价领域不断扩展, 针对特色功能区域进行的单一用途土地评价备受重视<sup>[2]</sup>。这其中既包括土地类型层面对耕地质量<sup>[3]</sup>、都市开发<sup>[4]</sup>、城区重建<sup>[5]</sup>、植被恢复<sup>[6]</sup>、绿色基础设施<sup>[7]</sup>等单一目标地类适宜等级评价, 也包括具体生境类型或自然现象如水鸟<sup>[8]</sup>、鱼类<sup>[9]</sup>、药材<sup>[10]</sup>、风能<sup>[11]</sup>等中小尺度特定对象的具体实践。这些研究无论从对象的细化程度还是方法的数理难度都已取得了不同程度的创新, 推动传统的评价理论框架不断完善。同时, 自1976年联合国粮农组织 (FAO) 发布第一份土地适宜性评价框架体系<sup>[12]</sup>, 其内容也已经过多次修订。FAO最近一次关于土地评价框架的修订报告发布于2007年<sup>[13]</sup>, 报告重申土地评价已不能再局限于产品层面的供给 (Goods provide), 而应重视服务层面的传递 (Services render), 全球变化、生物多样性、沙漠化等研究方法有必要纳入目前的评价框架中。

土地生态适宜性 (Ecological land suitability) 定量评价以生物多样性和生境保护为导向设置评价指标并叠加<sup>[14]</sup>, 可以有效支撑生态脆弱区或生态保护区的生态规划。对于典型林业县而言, 林地作为主要土地利用类型, 既需要制定完善的植被保护与培育措施

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330747) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330747]

作者简介: 刘焱序(1988-), 男, 陕西西安人, 博士, 研究方向为综合自然地理与景观生态。

E-mail: liuyanxu@pku.edu.cn

通讯作者: 王仰麟(1963-), 男, 陕西合阳人, 博士, 教授, 研究方向为景观生态与土地利用。

E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

以保障林地的各项生态系统服务，又需要兼顾木材生产等林产工业。在林地资源开发与保护的权衡中，有必要通过植被在空间上的不同生态适宜性判定生境保护或建设的优先区域。在近年的研究中，GIS技术与多目标决策方法在土地适宜性评价中被广泛应用<sup>[15]</sup>，静态的生境暴露特征和空间上的生境相互干扰已经可以在多数评价中得到有效表征。然而，植被生态过程的动态变化特征体现了气候变化和人类活动双重干扰下林地生境的演变，在这种干扰下适宜或非适宜的生境空间并非是一成不变的。那么，如果在时间尺度上出现了植被的持续性退化，即使这些空间单元在静态条件下生境质量较高，也难以认定该生境是生态适宜性高值区域。因此，为支持管理与决策有必要将生态适宜性的持续能力纳入评价体系，从时间维的角度判断生境空间在外界干扰下的可持续性。

在生物多样性和生境保护的目标导向下，生态系统自身的适应性逐渐受到关注，Gunderson和Holling构建了生态适应性循环理论<sup>[16]</sup>，以此解释人类与生态系统的交互作用。该理论在潜力与连通度的空间描述基础上加入了恢复力（Resilience）这一时间概念，特指系统受干扰后恢复稳态的能力<sup>[17]</sup>。恢复力概念关注生态系统的动态机制，强调以发展的视角看待生态系统的组织与更新<sup>[18]</sup>；恢复力研究站在可持续科学的高度上对管理目标和手段进行权衡<sup>[19]</sup>，关注在未来生态系统能否返回初始状态。因此，与传统的时间趋势变化分析相比，恢复力视角更侧重趋势的持续性，或者说是趋势外推的可能性或不确定性。具体在生态适宜性评价层面，恢复力视角可以表征在静态生境质量稳定的条件下，植被对外界干扰的不同适应能力。显然，植被适应能力强的区域林地资源开发或保护的可持续性较好，更多对应于生态适宜性较高的空间。鉴于此，本研究以土地生态适宜性评价为目标，以具体县域以林地为主的土地资源为对象，耦合恢复力指标对未来趋势可持续性的量度，综合采用多种GIS空间分析手段，定量明晰研究区生态适宜性的空间格局。

## 2 数据准备

### 2.1 研究区概况

汪清县位于吉林省延边朝鲜族自治州东北部（图1），面积9016 km<sup>2</sup>，是吉林省区域面积第二大县。该县地处长白山麓，属山区，平均海拔806 m。属于大陆性中温带多风气候，冬长夏短，四季分明，垂直变化较大，年平均气温3.9℃，年平均降雨量为580 mm。林业资源是该区域内最突出的自然资源，林地面积占县域土地总面积的89%以上，是极其典型的林业县。汪清地区具有国家一级保护动物东北豹和珍惜植物东北红豆杉两种濒危资源，并在2013年成立国家级自然保护区。因此，针对该县土地资源与生境特点，基于单一类型的土地生态适宜性评价模型，以汪清县域林地的生境综合质量与植被生长可持续性作为评价目标，符合土地生态适宜性理念关于生境保护和生物多样性的评价导向。

### 2.2 数据预处理

本研究试图以多种空间静态指标作为生境影响因素，完成基于静态的生境质量评

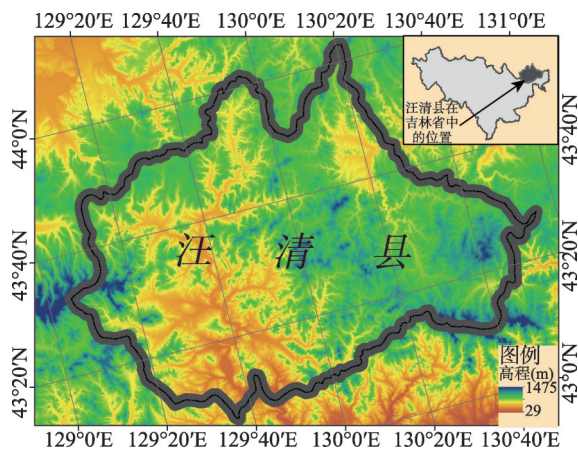


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of the study area

价。鉴于林区人口稀少，可以基本排除人类生活在空间上对生境的直接干扰，因此空间化的评价由地形、气候、土壤、植被等自然指标组成。最终选取高程、坡度、坡向、土壤养分、覆被类型、降雨侵蚀力6个要素，其中除降雨侵蚀力因子外均为遥感数据源。降雨侵蚀力由各气象站点30年平均降水月数据按薄板样条函数插值方法以经纬度作为自变量、高程作为协变量在ANUSPLIN软件中插值所得<sup>[20]</sup>。生成12个月的空间降水量图层后，按照常用的Wischmeier方法得出年降雨侵蚀力<sup>[21]</sup>。生境质量评价的具体考虑因素、指标、数据来源、归一化方法见表1，其中0表示质量最好，1表示质量最差。归一化后的生境质量指标空间分布（图2）。

归一化植被指数（NDVI）是表述植被覆盖时空变化的最常用指标。本研究采用MODIS卫星MOD13Q1植被指数16天合成产品，用以表征林地内生态系统的时空动态特征。数据源自美国地质调查局（USGS）网站，时间为2000年2月-2010年12月，空间分辨率约250 m。在预处理过程中将16天数据产品按所在月份进行平均并裁切，得到以月为单位的县域NDVI图层。考虑到数据源涉及30 m、约250 m、1 km三种不同分辨率，且研究区整体范围较小，最终选定250 m为计算结果图的分辨率。

表1 生境质量评价指标预处理  
Tab. 1 Pretreatment on habitat quality assessment indices

指标因子	敏感因素	数据来源	归一化方法
高程	生物多样性	地理空间数据云，30m分辨率 GDEM	根据分布规律将平均值加减2倍的标准差作为上下限，则1073以上为1，336以下为0，在此区间内正向归一化
坡度	土壤侵蚀	同上，ArcGIS中生成坡度	25°以上为1，2°以下为0，区间内正向归一化
坡向	生物多样性	同上，ArcGIS中生成坡向	南为0，东南、西南0.25，东、西、平地0.5，东北、西北0.75，北为1
覆被类型	土壤侵蚀， 生物多样性	寒区旱区科学数据中心，中国植被功能型数据 <sup>[22]</sup> ，合并部分地类	建设用地为1，耕地0.75，草地0.5，针叶林0.2，针阔混交林0.15，阔叶林0.1、湿地、水体0
土壤有机质	土壤侵蚀， 生物多样性	世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集(v1.1) <sup>[23]</sup> ，提取土壤有机碳含量代表有机质	按分布规律将表土有机碳0.74%以下赋为1，1.95%以上赋为0，区间内反向归一化
降雨侵蚀力	土壤侵蚀	中国气象科学数据共享服务网，插值时取全国671个站点，再将结果裁切	由分布规律知1300~2100 MJ·mm/(ha·h·a)间的像元占95.39%，其余较零散。因而设定2100以上为1，1300以下为0，区间内正向归一化

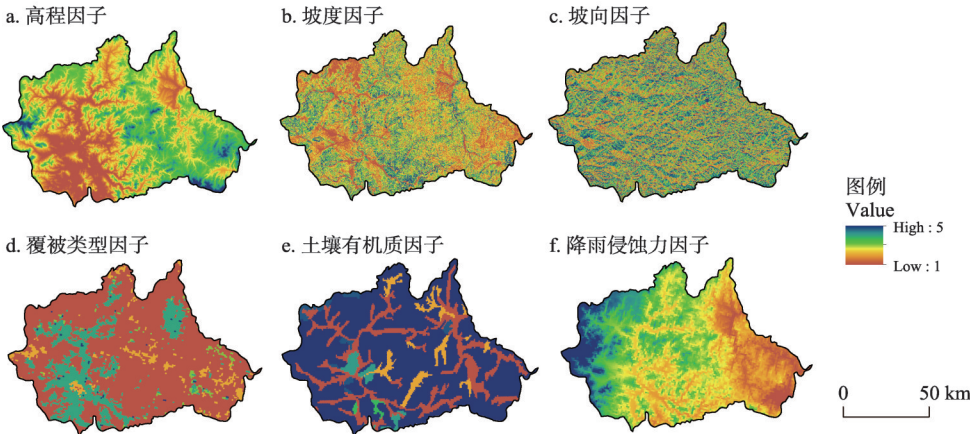


图2 归一化的生境质量空间指标  
Fig. 2 The normalization of spatial habitat quality indices



气象站点数据来自中国气象科学数据共享服务网汪清站自2000年1月起的月数据,包括极端气温、平均气温、降水量、相对湿度等。

### 3 研究方法

#### 3.1 研究概念框架与流程

关于土地适宜性评价的具体方法目前已趋于多样化,除传统的特尔斐法、线性回归法、层次分析法之外,将人工神经网络方法等人工智能算法应用于土地评价目前已不鲜见<sup>[2]</sup>。人工神经网络算法的优势在于对权值的自动调节能力,尤其适用于在缺乏权威专家的情况下降低人为主观赋权导致的不确定性。本研究采用人工神经网络作为传统静态的生态适宜性评价手段;并且,为了区分本文的土地生态适宜性评价体系与传统体系的不同,将评价过程命名为生境质量评价。

恢复力视角侧重于描述在干扰过程中生态系统的恢复能力,致力于建立可持续的生态管理模式。与简单的时间序列分析不同,恢复力概念更多考虑时间尺度上的社会—生态系统组织与更新,突出干扰与可持续两个重要概念。在具体实现过程中,对于具体生境的空间动态特征可以根据多时相遥感数据进行判别。但是,由于卫星发射至今的历史时长相对较短,所拟合得出的变化趋势不一定能表征一个长期的组织和更新作用。因此,本研究提出采用描述长期持续性的Hurst指数作为恢复力的空间表述方式,以趋势可持续性判断方法分别站在现状趋势和未来趋势的角度对生境生态恢复力进行描述(图3)。

#### 3.2 生境质量评价

在人工神经网络的使用中,不同网络结构的运行结果并不一定完全一致,因此有必要主观上对结果的合理进行判断。广义神经网络(Generalized Regression Neural Network, GRNN)是径向基函数神经网络的一种,其只有两个隐藏层即模式层和求和层,模式中隐藏单元的个数与训练样本的个数相同,网络计算结果具有全局收敛性<sup>[24]</sup>。自组织特征映射神经网络(Self-Organizing Feature Map, SOFM)通过无监督的自适应过程完成,只包含输入层和竞争层,通过权值调节达到紧邻神经元互相激励,远邻神经元互相抑制,最终得到获胜神经元,完成聚类<sup>[25]</sup>。这两种网络均可以较大程度的避免人为主观假定对预测结果的影响,但鉴于网络层数和监督机制的差异,前者一般用于评价具体数值,而后者一般用于聚类。

两种ANN模型在Matlab平台2012a版本中实现,样本建立中设立100个随机数均分为4组,分别隶属于0~0.25, 0.25~0.5, 0.5~0.75, 0.75~1。在GRNN模型中将训练目标

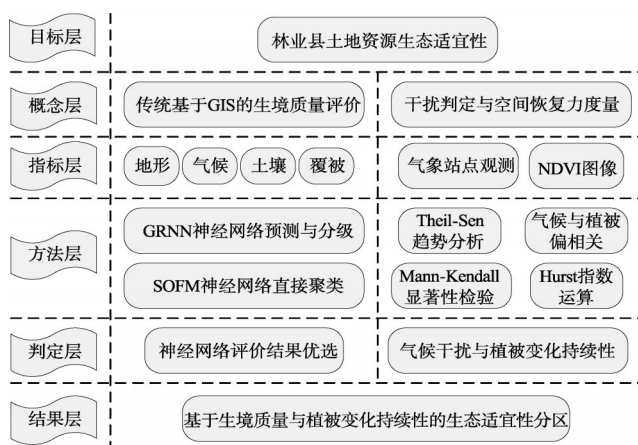


图3 耦合恢复力的土地生态适宜性评价概念框架与流程  
Fig. 3 The conceptual framework and materialization coupled with resilience perspective

得分定为1、2、3、4,依次生成每组25个共4组的相同得分,共1000个与随机数一一对应,即0~0.25得分为1以此类推。之后带入阈值为0~1的生境质量空间指标后会输出值域为1~4的评价结果。在SOFM模型中则不需要训练目标得分。在编码中,设置GRNN模型网络建立时spread = 1.4, SOFM模型网络建立拓扑TFCN = 'gridtop', Di = [2, 2]。

### 3.3 植被时序变化趋势

基于NDVI的绿色表征是对生境植被状况差异的反映,是社会—生态系统研究的常用空间指标<sup>[26]</sup>。在植被时序趋势分析中, Theil-Sen 趋势分析和Mann-Kendall 检验方法对数据误差具有较强的鲁棒性,结果较为科学可信<sup>[27]</sup>。其中, Theil-Sen 方法是计算  $n(n-1)/2$  个数据组合的斜率的中位数,可以减少数据异常值的影响,其公式为<sup>[28]</sup>:

$$S_{NDVI} = \text{Median} \left( \frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i} \right), \forall j > i, \quad (1)$$

式中:当  $S_{NDVI} > 0$  时,植被呈增长趋势,反之则成退化趋势。

Mann-Kendall 方法作为一种非参数检验,无需样本服从一定的分布,并且不受少数异常值干扰,其公式为<sup>[28]</sup>:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) = \begin{cases} 1, NDVI_j - NDVI_i > 0, \\ 0, NDVI_j - NDVI_i = 0, \\ -1, NDVI_j - NDVI_i < 0 \end{cases} \quad s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

式中:  $NDVI_i$  和  $NDVI_j$  分别表示像元  $i$  年和  $j$  年的 NDVI 值;  $n$  表示时间序列的长度;  $\text{sgn}$  是符号函数;统计量  $Z$  取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ , 本研究取 0.05 置信水平即  $\pm 1.96$  作为显著与非显著的界定标准。

### 3.4 偏相关分析

地理系统是一个多要素构成的复杂系统,这决定了任何一个驱动要素的变化会导致其他驱动要素的同时变化,影响驱动力的分析效果。偏相关分析是指研究某一类要素与其他要素的相关程度时,通过控制变量法将其他要素视为常数的方法,可以有效排除要素自身相关的影响。偏相关计算公式为<sup>[29]</sup>:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中:  $r_{xy \cdot z}$  表示变量  $z$  固定后变量  $x$  与  $y$  的偏相关系数;  $r_{xy}$ 、 $r_{xz}$ 、 $r_{yz}$  分别表示  $x$  与  $y$ 、 $x$  与  $z$ 、 $y$  与  $z$  之间的相关系数。  $x_{ij}$  表示第  $i$  年 第  $j$  月的 NDVI 值;  $y_{ij}$  表示第  $i$  年 第  $j$  月或  $(j-1)$  月的气候要素站点观测值。

### 3.5 趋势可持续性评价

趋势分析所得出的结果仅能说明现阶段的样本变化特征,并不能反映趋势可持续或不可持续的差别。基于重标极差(R/S)分析方法的Hurst指数可以有效判定NDVI时间序列的持续性或反持续性作用,其基本原理为<sup>[30-31]</sup>:

给定一时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t = 1, 2, \dots$ , 对于任意正整数  $\tau = 1$ , 定义均值序列:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

累积离差: 
$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

极差: 
$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (6)$$

标准差: 
$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (7)$$

若存在  $R/S \propto \tau^H$ , 则说明时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t = 1, 2, \dots$  存在 Hurst 现象。Hurst 指数用  $H$  值表示, 其值可在双对数坐标系 ( $\ln \tau$ ,  $\ln R/S$ ) 中用最小二乘法拟合得到<sup>[29]</sup>。 $H$  越接近于 1, 则前面判定的趋势持续性越强;  $H$  越接近于 0, 趋势反持续性越强;  $H$  越接近于 0.5, 未来变化趋势与前面判定的趋势相关性越小。

## 4 结果分析

### 4.1 生态质量等级划分

GRNN 模型运行结果显示 (图 4a), 大部分像元值聚集在 2~3 分之间, 为在显示上体现对比效果, 以 2.1、2.6、3.1 作为分界标准; 图 4b 为 SOFM 模型聚类结果, 直接根据类型对应的属性依次命名。通过对比发现, 两个结果所反映的生境质量空间分异规律是基本一致的, 局部的差别可能与 GRNN 手动分界时阈值的不确定有关。因此, 两个不同机理的神经网络结果基本可以被相互印证, 有监督的 GRNN 模拟结果可以表述具体的生境质量, 而无监督的 SOFM 模型可以用于等级的划分。需要注意的是, 如果在 GRNN 模拟结果的基础上再次聚成 4 类作为结果, 实际上等于在网络模拟不确定性的基础上又添加了分类标准的不确定性, 反而不如直接基于 6 个原始指标进行的无监督神经网络分类。因此, 将 SOFM 聚类结果作为等级划分结果, 而 GRNN 评价结果作为对聚类的定量验证。

评价得出的低质量区域多位于高程较高、坡度较大、降雨侵蚀较严重、土壤有机碳含量较低的地区, 因而在生物多样性和土壤侵蚀角度可能会面临一些自然层面上的胁迫。研究区东部土壤有机质含量高、降雨侵蚀力低、植被类型多为自然生长的阔叶与针叶林, 森林生态系统功能相对完整, 有较高的生境质量。研究区整体生境质量呈现东高西低的格局, 且低质量区域范围很小; 高质量与较高质量生境多分布在河谷地带, 空间分布的纹理清晰; 中等质量区面积最大, 这并不表示该县大面积区域生境质量一般, 而仅仅是由于少部分生境质量较为突出, 而剩余部分的生境质量比较相近, 在静态层面上对于本研究区广泛林区而言, 中等以上等级的生境质量都应当是生态本底条件适合森林生长的。

### 4.2 植被变化时空趋势

采用汪清县边界裁切 NDVI 图层, 并计算边界范围内 NDVI 的像元月均值, 并将结果与汪清气象站的月均温数据对比 (图 5)。研究结果表明, 2000-2010 年间研究区月平均气温和平均 NDVI 都有上升趋势。对于该趋势显示中有两点不确定性需要说明: 一是 NDVI 的线性斜率小于气温, 并不表明 NDVI 的变化趋势就一定慢于气温, 这是因为斜率的大小与 Y 轴值域的数量级有关; 二是由于 2000 年 NDVI 开始月份为 2 月, 可能会导致部分误差, 但经调试后发现, 即便假设 2000 年 1 月出现时间序列各年 1 月最小值或最大



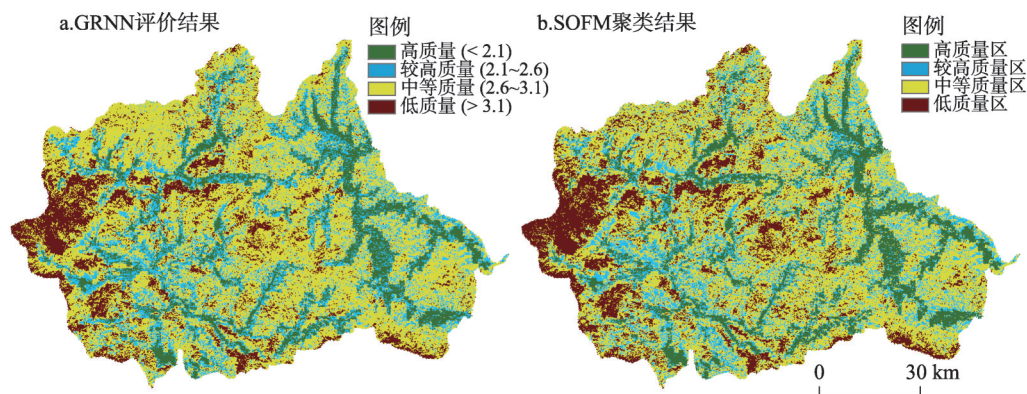


图4 生境质量等级划分

Fig. 4 Classification for the habitat quality

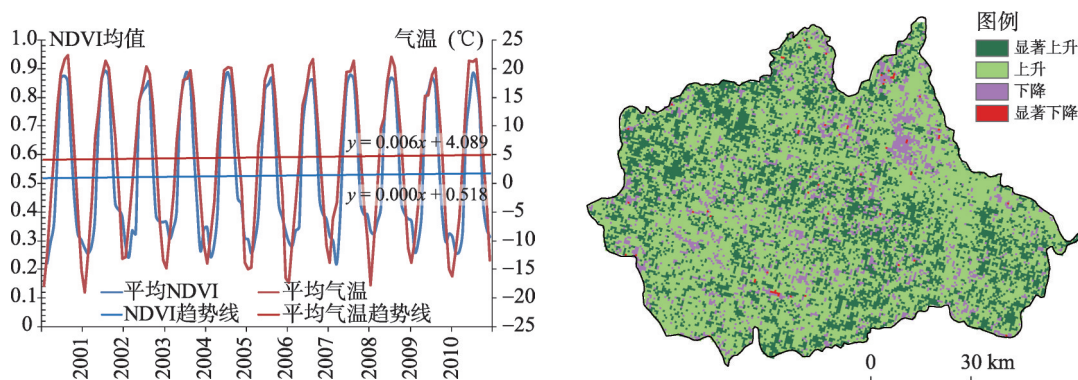


图5 气温与NDVI均值变化

Fig. 5 Changes of temperature and mean NDVI

图6 NDVI空间变化趋势

Fig. 6 Spatial change trend of NDVI

值,即大幅降低或升高序列初始值,其拟合直线的斜率并不发生大幅波动,不改变植被稳定生长的结论,结果趋势基本可信。

将NDVI月数据求年平均值,并将其变化趋势与显著性空间化如图6所示。可以发现,2000-2010年间绝大部分像元的NDVI均有所上升,仅有东北部罗子沟镇有部分NDVI值出现下降,而显著上升的像元数量明显高于显著下降的像元;由此在这11年间植被整体恢复的假设是可以成立的。并且,这种县域境内植被全面恢复的现象大多是由宏观气候变化影响导致的,因为人类管理层面的重点植被恢复措施一般会更容易在地域空间上显著展现。因此,有必要分析气候变化与植被变化的关联特征。

#### 4.3 植被变化的气候驱动力

以气象站点周围10 km为半径,通过生成500余个空间随机点采样并求均值,取得NDVI月均数据。由于县城并无明显植被覆盖,因此通过随机点的采样方式可以控制采样点落在林地上,逻辑上的合理程度高于直接半径画圆求平均。采用常用的温度与水分因子与站点周围NDVI均值作相关性分析(表2)。研究表明,研究区植被生长与温度因子的相关性大于与水分因子的相关性,其中平均水汽压虽然表示水分因素,但与平均气温的相关性高达0.92,主要由温度所决定。在温度因子中,低温对植被的影响略高于高温,平均值的影响略高于极端值。结果反映了气温可能是植被变化的主要驱动力,而全球变暖背景下温度的上升可能是植被恢复的主要因素。

表2 NDVI与主要气象因子的相关性

Tab. 2 Correlations between NDVI and meteorological factors

因子	不滞后	滞后一个月	因子	不滞后	滞后一个月
极端最低气温	0.91**	0.91**	平均气温	0.91**	0.89**
平均最低气温	0.92**	0.89**	降水量	0.64**	0.65**
极端最高气温	0.85**	0.87**	平均水汽压	0.93**	0.84**
平均最高气温	0.91**	0.88**	平均相对湿度	0.72**	0.46**

注：\*\*表示在0.01水平（双侧）显著相关。

以月平均气温和月降水量作为温度和水分的代表性因素进一步开展偏相关分析。在以降水量作为控制变量的情况下，不滞后条件下平均气温与NDVI的相关性为0.85，滞后一个月条件下平均气温与NDVI的相关性为0.82；在以平均气温作为控制变量的情况下，不滞后条件下降水与NDVI的相关性为0.17，滞后一个月条件下降水与NDVI的相关性为0.23。结果显示降水量未通过显著性检验，这与侯光雷等（2012）采用偏相关方法对邻近研究区的长白山地区植被变化分析结果一致<sup>[32]</sup>；结果也证明了研究区植被变化主要由气温所决定，与南颖等（2010）利用MODIS数据对长白山地区植被变化分析结论基本一致<sup>[33]</sup>。偏相关分析结果显示当月气温与NDVI的相关性大于上个月的气温，而当月降水与NDVI的相关性小于上个月降水，证明了降水对NDVI的滞后性大于气温，与神祥金等（2013）对东北地区NDVI与气候关系的研究结果基本符合<sup>[34]</sup>。偏相关结果更进一步说明，县域内植被恢复主要由温度上升而非降水变化所驱动。

4.4 植被变化趋势的可持续性

由于Hurst指数越趋于0.5，表示持续性判定的不确定性越强。为区分这种不确定性，本研究暂定Hurst指数在0.4~0.6之间不能判定持续性，只能描述植被的可能恢复与退化。而在该阈值以上或以下则可认为有明确的持续或反持续规律。由此叠加NDVI空间变化趋势图，得出植被变化趋势的可持续性，并以恢复力程度作为等级划分标准（图7）。其中，高度恢复区是指NDVI持续显著上升的像元，持续恢复区是指NDVI持续上升或反持续下降的像元，可能恢复区是指NDVI上升或显著上升但持续性不明显的区域，而此外的NDVI下降或反持续上升的部分统一归并到退化与可能退化区。显然，持续性的植被显著恢复显然是生境的最佳状态，非持续性的退化和可能性的恢复都是对生境评价的正面描述，只有可能或持续性的退化，以及反持续性的恢复，是对生境未来发展不利的。由结果可知，只有少数像元属于退化与可能退化区。可以推测，在周围大部分生境出现植被绿度增加这一趋势时，其中相间的少部分生境出现植被绿度退化可能是受到人类干预的，也就是所谓的“干扰”过程。

4.5 生态适宜性分级

由于栅格化结果较为破碎化，采用DEM所生成的子流域作为生态适宜性分级的基本单元（图8）。通过生境质量评价和恢复力判定，按照生境质量越好、恢复力越强则生态适宜性越高的分级依据，将研究区分为高适宜区、较高适宜区、中等适宜区、较低适宜区、低适宜区。在分级过程中遵循以下原则，恢复力分区属于退化与可能退化区的像元最高只能定为较低适宜区，恢复力分区属于持续恢复区的像元最低可定为中等适宜区，除退化部分外生境质量中等及以上水平的像元定为中等适宜区及以上级别（表3）；从而将所有高质量和高度持续恢复像元归并到高、较高适宜区，将所有低质量和退化、可能退化像元归并到低、较低适宜区。

结果表明，研究区大部分地域适于林业布局，而东北部的罗子沟镇局部区域适宜程度较低。罗子沟镇生境质量本底条件较好，但由于该区域耕地较多，人类活动强度较



大，经营模式的改变会对植被生长产生较大影响。罗子沟镇作为延边州第二大镇与汪清县第一镇，土地肥沃，适合各种农作物及经济作物生长，有延边州“粮仓”之誉。由于该区自然本底条件较好，因此在生境质量评价中有较多的高质量像元。然而，耕地广布与人类活动强度大使该市体现出明显的空间异质性。该区域在自然生境状况较好的前提下植被出现退化，主要是土地利用方式变化造成的。对比 Google Earth 影像，判定这部分退化的植被以耕地为主，人类管理在生态恢复角度可能起负向作用。罗子沟镇与黑龙江省东宁口岸较近，农产品可直接销往俄罗斯，因此就粮食安全和农民收入的角度考虑，在保证生态系统的完整性与可恢复性的前提下，对耕地面积应当以维持为主。其中占补平衡、规模经营等管理政策值得在后续工作中深入探讨。

5 结语

本研究针对特色林业县林地资源生态适宜性评价探讨，在概念体系、方法实现等层面进行探索，得出以下结论：① 在概念体系方面，土地适宜性评价中指标的静态化往往成为评价可信度的限制因素。本研究将生态恢复力理论引入土地生态适宜性评价中，并基于地理学视角将恢复力评价模型与方法具体化，构建出包含生境质量与恢复力的土地生态适宜性评价概念模型，有效反映了土地评价过程中的时空二维视角；② 在方法实现方面，本研究将不同人工神经网络运算相对比降低不确定性，用趋势分析和偏相关判断植被变化的驱动因素，将 Hurst 指数应用于生态恢复持续性的描述。其中所用到的 SOFM 神经网络聚类、Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、R/

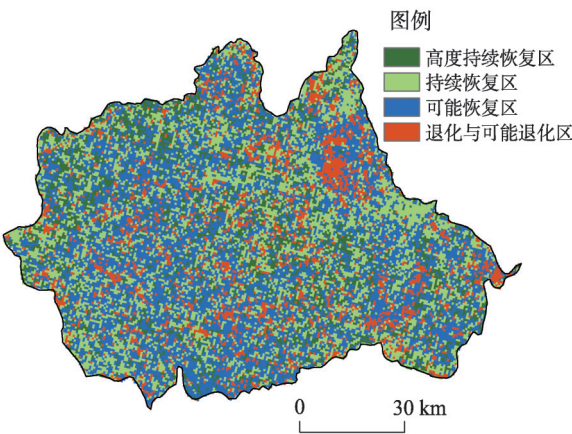


图7 植被变化持续性分区  
Fig. 7 Sustainability classification of vegetation change

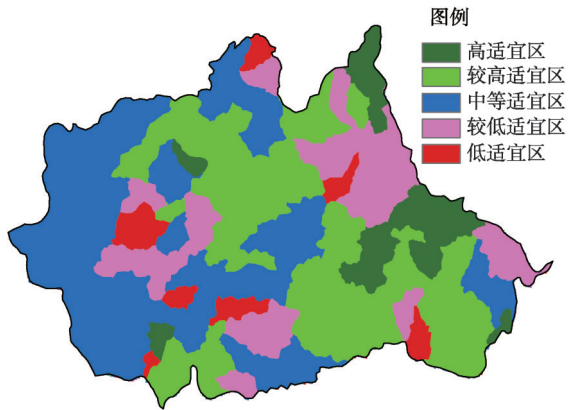


图8 林地生态适宜性等级划分  
Fig. 8 Classification for ecological forest suitability grading

表3 生态适宜性分级方式  
Tab. 3 Classification method for ecological forest suitability

分区	组合关系
高适宜区	高质量生境—高度持续恢复，较高质量生境—高度持续恢复，高质量生境—持续恢复
较高适宜区	高质量生境—可能恢复，较高质量生境—持续恢复，中等质量生境—高度持续恢复，中等质量生境—持续恢复
中等适宜区	较高质量生境—可能恢复，中等质量生境—可能恢复，低质量生境—高度持续恢复，低质量生境—持续恢复
较低适宜区	高质量生境—退化与可能退化，较高质量生境—退化与可能退化，低质量生境—可能恢复
低适宜区	中等质量生境—退化与可能退化，低质量生境—退化与可能退化

S分析等手段均有较好的数理定量效果,可以有效降低评价中主观因素的干扰;③在结果内涵方面,低质量生境区域多位于高程较高、坡度较大、降雨侵蚀较严重、土壤有机碳含量较低的地区;2000-2010年研究区气温有上升趋势,绝大部分地域出现植被恢复且主要由气候变暖所驱动;恢复力空间化显示只有少部分区域未来植被会退化或可能退化,这部分退化的人为影响较大。将生境质量图层与恢复力图层叠加统计得出流域尺度林区生态适宜性评价结果图,可展示静态生境质量和动态植被变化两个层面的适宜性空间分异规律。

在指标选取角度,在多目标决策土地评价中往往借助遥感反演数据图层进行叠加,获取空间化的土地自然属性。具体到生态适宜性评价中,一般将图层叠加结果表明生境质量较好的部分默认为其生态适宜,而这实际上忽视了非空间化的一些干扰因素。由于干扰的作用结果在空间上体现是需要时间的,因此加入时间指标,实际上是力图达到“时间换空间”的研究目的。更具体来说,静态的适宜性评价多数限于当前时点,而一般不考虑全球变暖与人类管理强度改变引起的后果,这些因素的作用效果需要通过时间趋势去表达。本研究基于传统的土地生态适宜性评价体系,强调生态适宜性的多维特征尤其是时间维的特征,认为生态适宜性不是恒定的而是可以通过管理手段改变的。这种基于时间演变过程的适宜性判定突出了生态可持续的视角,使得出的适宜性评价不仅具有空间分异性,而且具有趋势预见性,提升了生态适宜性评价结果的实用性。

在方法应用角度,恢复力作为恢复生态学中的核心理念,强调阈值、可持续与管理方式,显然在干扰下的生态系统未来恢复的能力也是其生态适宜特性的一种体现,纳入该概念模型可以统一干扰、变化、持续性、管理等多个视角,避免了逻辑概念的零散化,使生态适宜性评价结果可以由生境质量与恢复力两个子评价结果进行直接综合。然而,恢复力作为一个抽象概念并没有普遍取得共识的量化方式,尤其从概念走向应用一直是方法学上的难点,尤其是针对空间像元的评判比较罕见。目前,已有一些学者将Hurst指数应用于植被变化持续性描述中<sup>[28-29, 35]</sup>,但目前这种应用尚限于时空格局的表述阶段。而本文借助Hurst指数将持续性空间化,可以作为在空间层面描述恢复力的一次有益探索。在气候变暖导致植被恢复的背景下,通过恢复力概念视角和Hurst指数具体方法对植被未来可能出现退化的地区进行识别,无疑在林业管理层面有重要参考价值。

在尺度选择角度,对于GIS空间图层运算而言,县域尺度研究缺乏足够的像元样本,事实上加大了分析的难度。一般在对空间数据的分析中,能进行小尺度研究的,大多数可以扩大范围进行更广泛区域的分析,而在大尺度层面上的数据分析手段则不一定能分析小尺度问题。这是由于小尺度的数据精度要求会略高于大尺度,例如早期的AVHRR等卫星传感器分辨率较低,只能进行省际研究而无法区分县域内部差异。本研究作为方法探索,选取了典型林业县作为案例,但所采用的开源数据可以支持省际以上尺度的运算。

## 参考文献(References)

- [1] Ni Shaoxiang. Progress in the research on land evaluation in China during the latest ten years. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6): 672-683. [倪绍祥. 近10年来中国土地评价研究的进展. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 672-683.]
- [2] Shi Tongguang, Zheng Guoqiang, Wang Zhiyong et al. Progress in research on land suitability evaluation in China. *Progress in Geography*, 2007, 26(2): 106-115. [史同广, 郑国强, 王智勇等. 中国土地适宜性评价研究进展. *地理科学进展*, 2007, 26(2): 106-115.]
- [3] Liu Y L, Jiao L M, Liu Y F et al. A self-adapting fuzzy inference system for the evaluation of agricultural land. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 40: 226-234.

- [4] Gong J Z, Liu Y S, Chen W L. Land suitability evaluation for development using a matter-element model: A case study in Zengcheng, Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 2012, 29: 464-472.
- [5] Wang H, Shen Q P, Tang B et al. An integrated approach to supporting land-use decisions in site redevelopment for urban renewal in Hong Kong. *Habitat International*, 2013, 38: 70-80.
- [6] McVicar T R, Van Niel T G, Li L T et al. Parsimoniously modelling perennial vegetation suitability and identifying priority areas to support China's re-vegetation program in the Loess Plateau: Matching model complexity to data availability. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 1277-1290.
- [7] Greca L P, Rosa D L, Martinico F et al. Agricultural and green infrastructures: The role of non-urbanised areas for eco-sustainable planning in a metropolitan region. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 2193-2202.
- [8] Dong Z Y, Wang Z M, Liu D W et al. Assessment of habitat suitability for waterbirds in the West Songnen Plain, China, using remote sensing and GIS. *Ecological Engineering*, 2013, 55: 94-100.
- [9] Mouton A M, Alcaraz-Hernández J D, Baets B D et al. Data-driven fuzzy habitat suitability models for brown trout in Spanish Mediterranean rivers. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26: 615-622.
- [10] Lu C Y, Gu W, Dai A H. Assessing habitat suitability based on geographic information system and fuzzy: A case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. in Qinling Mountains, China. *Ecological Modelling*, 2012, 242: 105-115.
- [11] Burkhard B, Opitz S, Lenhart H et al. Ecosystem based modeling and indication of ecological integrity in the German North Sea—Case study offshore wind parks. *Ecological Indicators*, 2011, 11: 168-174.
- [12] FAO. A framework for land evaluation. *Soils Bulletin*, No.32, FAO, Rome, 1976.
- [13] FAO. Land evaluation, towards a revised framework. *Land & Water Discussion Paper 6*, FAO, Rome, 2007.
- [14] Ferretti V, Pomarico S. Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the analytic network process technique and Ordered Weighted Average approach. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 507-519.
- [15] He Yingbin, Chen Youqi, Yang Peng et al. An overview and perspective of alien land suitability evaluation study based on GIS technology. *Progress in Geography*, 2009, 28(6): 898-904. [何英彬, 陈佑启, 杨鹏等. 国外基于GIS土地适宜性评价研究进展及展望. *地理科学进展*, 2009, 28(6): 898-904.]
- [16] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington D. C.: Island Press, 2002.
- [17] Sun Jing, Wang Jun, Yang Xinjun. An overview on the resilience of social-ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5371-5381. [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.]
- [18] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 2006, 16: 253-267.
- [19] Turner II B J. Vulnerability and resilience: Coalescing or paralleling approaches for sustainability science? *Global Environmental Change*, 2010, 20: 570-576.
- [20] Hutchinson M F. *Anusplin Version 4.2 User Guide*. Australian National University, Canberra, 2001.
- [21] Wischmeier W H. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26: 189-193.
- [22] Youhua Ran, Xin Li, Ling Lu et al. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(1): 169-191.
- [23] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S et al. *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008.
- [24] Wasserman P D. *Advanced Methods in Neural Computing*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993, 155-1611.
- [25] Kohonen T. Engineering Applications of SOFM. *IEEE Transactions on Neural Network*, 1996, 84: 1358-1383.
- [26] Petrosillo I, Zaccarelli N, Zurlini G. Multi-scale vulnerability of natural capital in a panarchy of social-ecological landscapes. *Ecological Complexity*, 2010, 7: 359-367.
- [27] Cai Bofeng, Yu Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170-1186. [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.]
- [28] Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806. [袁丽华, 蒋卫国, 申文明等. 2000-2010年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.]
- [29] Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 897-908. [刘宪锋, 任志远, 林志慧等.]



- 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 897-908.]
- [30] Rao A R. Hypothesis testing for long-term memory in hydrologic series. *Journal of Hydrology*, 1999, 216: 183-196.
- [31] Peng J, Liu Z, Liu Y et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 28-39.
- [32] Hou Guanglei, Zhang Hongyan, Guo Dan et al. Spatial-temporal variation of NDVI in the growing season and its sensitivity to climatic factors in Changbai Mountains. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 285-292. [侯光雷, 张洪岩, 郭聃 等. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性. 地理科学进展, 2012, 31(3): 285-292.]
- [33] Nan Ying, Liu Zhifeng, Dong Yehui et al. The responses of vegetation cover to climate change in the Changbai Mountain area from 2000 to 2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(6): 921-928. [南颖, 刘志锋, 董叶辉 等. 2000-2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究. 地理科学, 2011, 31(6): 921-928.]
- [34] Shen Xiangjin, Wu Zhengfang. Variation of vegetation in the Northeast China and its response to meteorological factors. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science)*, 2013, 45(1): 123-130. [神祥金, 吴正方. 东北地区植被 NDVI 变化及对气象因子的响应. 东北师大学报(自然科学版), 2013, 45(1): 123-130.]
- [35] Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 960-970. [李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(7): 960-970.]

## Land ecological suitability assessment for forest coupled with the resilience perspective: A case study in Wangqing county, Jilin province, China

LIU Yanxu, WANG Yanglin, PENG Jian, WEI Hai, SONG Zhiqing, ZHANG Xiaofei  
(Ministry Education Key Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental  
Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This article tries to examine the changing trend and sustainability of vegetation according to the resilience concept. Then it analyzes the wood land habitats in a typical forest county from a temporal-spatial perspective. Moreover, artificial neural network, trend analysis, partial correlation analysis and R/S analysis were adopted to respectively evaluate the habitat quality, the change of vegetation, the driving force and the judgment of trend dependence. The result shows that there exists good ecological suitability on watershed level. The low ecological suitable region is in the habitat with a poor natural background and intense human activity, while the high ecological suitable region has good ecological conditions in the habitats and the sustainable ability in ecological resilience. This study uses Hurst index to judge the persistence as the spatial expression of resilience. In this concept system, the resilience perspective can be applied in specific regional forestry management. Compared with the subjective evaluations, the mathematical measurement methods used in this article, such as neural network clustering of SOFM, the trend analysis of Theil-Sen Median, and the significance test of Mann-Kendall, can effectively reduce the uncertainty.

**Keywords:** forest land; resilience; habitat quality; partial correlation; Hurst index