

长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估

朱 琪^{1,2} 周旺明¹ 贾 翔³ 周 莉¹ 于大炮¹ 代力民^{1*}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³长白山科学研究院, 吉林二道白河 133613)

摘 要 在全球变化与人类活动的双重冲击下,探究自然保护区及其周边区域的生态脆弱状况对于保证区域的生态安全和人类自身的可持续发展至关重要.以长白山国家自然保护区及其周边 30 km 缓冲区为研究区域,结合“敏感度-恢复力-压力度”概念模型和空间主成分分析法评估保护区内外 2005 和 2015 年的生态脆弱状况并分析其背后的主要驱动因子.结果表明:2005 和 2015 年,保护区内外的生态脆弱性等级均以潜在脆弱、微度脆弱和轻度脆弱为主,该区域的生态脆弱状况总体处于较好水平;2005—2015 年间,保护区内外整体的生态脆弱性呈现略微上升趋势,区内、外发生退化的区域面积分别为 254 和 967 km²,区内、外对该趋势的贡献占比分别为 30.8%和 69.2%;区内生态脆弱性在空间格局上的变化主要与净初级生产力(NPP)、植被覆盖度和距离道路最近距离的变化有关,而在区外,主要与 NPP、植被覆盖度、国内生产总值(GDP)密度的变化有关.

关键词 生态脆弱性;“敏感度-恢复力-压力度”模型;地理探测器;自然保护区

Ecological vulnerability assessment on Changbai Mountain National Nature Reserve and its surrounding areas, Northeast China. ZHU Qi^{1,2}, ZHOU Wang-ming¹, JIA Xiang³, ZHOU Li¹, YU Da-pao¹, DAI Li-min^{1*} (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Changbai Mountain Academy of Sciences, Erdaobaihe 133613, Jilin, China).

Abstract: Exploring the ecological vulnerability of nature reserve and its surrounding area is essential to the maintenance of regional ecological security and sustainability of human development, especially under the stress of global change and human activities. Based on the integration of "sensitivity-resilience-pressure" conceptual model and spatial principal component analysis (SPCA), we analyzed the ecological vulnerability of Changbai Mountain National Nature Reserve and its surrounding 30 km buffer in 2005 and 2015. The main driving factors were further analyzed. The results showed that the ecological vulnerability of Changbai Mountain Nature Reserve was mainly potential, slight, and light levels in 2005 and 2015, indicating the ecological vulnerability inside and outside the reserve was in a good condition. For the whole region, the ecological vulnerability showed a slight downward trend from 2005 to 2015. The degradation area inside and outside the reserve were 254 and 967 km², respectively, with the contribution rate to the increase of overall vulnerability being 30.8% and 69.2%, respectively. The changes in ecological vulnerability inside the reserve were mainly related to the changes in net primary production (NPP), vegetation coverage, and the nearest distance to the road, whereas it was mainly related to the changes in NPP, vegetation coverage and gross domestic product (GDP) density outside the reserve.

Key words: ecological vulnerability; "sensitivity-resilience-pressure" conceptual model; geodetector model; nature reserve.

本文由国家重点研发计划项目(2018YFC0507305)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFC0507305).

2019-02-11 Received, 2019-04-04 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@126.com

近几十年来,随着人类活动的不断加剧与全球变化问题的日益凸显,全球范围内生态与环境问题正在大量涌现,生态系统自身的恢复能力和自净能力不断下降,人类所处的生存环境正呈现出越来越脆弱的趋势^[1-3],关于生态系统脆弱性评估的相关研究引起了广泛关注.

区域生态系统脆弱性评估的核心内容是指标体系的筛选和评估方法的确定.通过逻辑概念模型框架来帮助研究区选择合适的指标是常用的做法,目前主要的逻辑框架模型有“压力-状态-响应”模型^[4]、“暴露度-敏感度-恢复力”模型^[5]、“敏感度-恢复力-压力度”模型^[6]等,其中,“敏感度-恢复力-压力度”模型依据生态系统稳定性的内涵而构建,其模型结构相对全面而系统地包含了生态系统脆弱性的基本要素,在进行生态系统脆弱性评估时已经得到了广泛应用^[7].关于区域生态脆弱的评估方法,目前使用较多的有模糊综合评价法^[8]、综合评价法^[9]、层次分析法^[10]和灰色模型法^[11]等,但这些评价方法在指标权重设置时需要依赖研究人员的先验知识,因此都带有一定的主观性^[12].相较而言,主成分分析法作为一种经典的统计方法,能够通过减少原始数据的维度并将之转化为所选主成分的线性组合,在一定程度上避免了上述几种方法存在的指标权重确定时的主观性^[5].

自然保护区是我国自然保护体系中的核心^[13],它除了能保护自然生态系统^[14]、维持生物多样性外^[15],还能提供与人类自身需求直接相关的多种生态系统服务^[16],因而了解其生态脆弱状况及其驱动机制,对于地区生态安全的保障与人类自身的可持

续发展具有重要意义.目前,国内已经开展生态脆弱性评估的区域主要集中于农牧交错带^[17]、高寒山地^[18]和喀斯特地区^[19]等生态脆弱区域,关于自然保护区及其周边区域生态脆弱评估的报道则相对较少^[20-21].

长白山自然保护区是我国东北地区面积最大、保存最为完好的原始生态系统,是我国东北地区的天然生态屏障^[22].但是,近年来该地区旅游活动兴起,旅游人数大量增加;此外,保护区所在的东北地区本身气候变化明显^[23],这些自然和人为因素势必会对当地的生态脆弱性产生影响,进而有可能危及到整个东北地区的生态安全.因此,本研究基于地理信息系统和遥感技术,采用空间主成分分析和概念框架模型相结合的办法,评估并对比分析长白山自然保护区及其周边地区 2005 和 2015 年生态脆弱性状况,分析其形成原因和驱动机制,揭示气候与人为因素对该区域生态系统的影响,以期为区域生态修复和环境管理提供科学的指导^[24].

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省长白山自然保护区(41°41′—42°25′ N、127°42′—128°16′ E)及其周边 30 km 缓冲区域,总面积 9587 km².该地区自然条件复杂,垂直地带性明显,具有典型的山地垂直自然景观特征.研究区属于温带大陆性山地气候,气温在 -7~3 ℃,年日照时数约 2300 h,年降水量在 700~1400 mm,其中,6—9 月降水占全年降水量的 60%~70%.

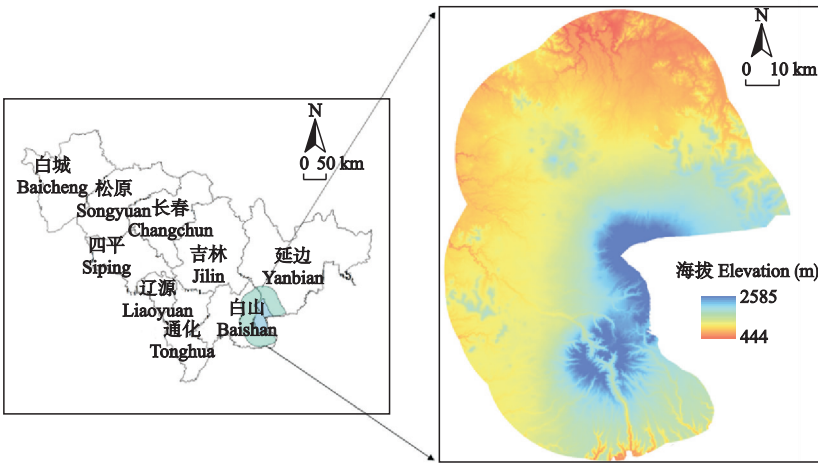


图 1 研究区位置
Fig.1 Location of study region.

1.2 数据来源与预处理

数据主要包括 2005 和 2015 年两个时期的气象数据、地形数据、土壤属性数据、河流水系与道路数据、社会经济数据和土地利用遥感监测数据,结合 ArcGIS 和 ENVI 等软件,得到多指标空间数据集用作进一步的分析和分析.由于本研究涉及评价指标较多,部分高精度的空间数据获取难度较大,因此在数据处理过程中,将所有不同分辨率的空间数据统一重采样为 1 km×1 km,并设置空间数据的投影为 UTM 投影(分度带为 50N).

1.2.1 气象数据 气温、降水数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),其空间栅格数据通过保护区周边 4 个气象站点的观测值,根据克里金插值法插值并掩模得到.

1.2.2 地形数据 海拔、坡度和地形起伏度数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),根据数字高程模型(DEM)计算得到.

1.2.3 土壤数据 土壤质地和土壤有机质数据分别来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)和全国第二次土壤普查数据.土壤有机质利用观测值根据克里金插值法插值并掩模得到.

1.2.4 河流水系与道路数据 河流图与道路图分别来自中国科学院资源环境科学数据中心所提供的 1 : 400 万河流空间分布数据集(<http://www.resdc.cn>)和 NASA 社会经济数据和应用中心(<https://doi.org/10.7927/H4VD6WCT>).

1.2.5 社会经济与人口数据 GDP 密度和人口密度数据来自中国科学院资源环境科学数据中心所提供的中国人口分布公里网格数据集和中国 GDP 千米网格数据集(<http://www.resdc.cn>).该数据以全国县域人口和 GDP 统计数据为基础,考虑了与人类活动密切相关的多种因素,实现了社会经济数据的空间化;土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心提供的土地利用现状遥感数据集(<http://www.resdc.cn>).

1.2.6 其他数据 净初级生产力(NPP)数据根据光能利用率模型(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)计算获得^[25];植被覆盖度数据是基于 NDVI 数据产品(MOD13A1),根据像元二分模型计算得到^[26];土壤侵蚀强度是根据通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RULSE)计算获得^[27];生境质量数据是根据生态系统服务功能评价

模型(integrated valuation of environmental services and tradeoffs, InVEST)中的生境质量模块评估得到^[28].

1.3 研究方法

1.3.1 生态脆弱性评价指标体系构建 SRP 模型是一项专门用于生态脆弱性评估的模型^[6],是依据生态环境脆弱性概念内涵构建的模型,该模型主要由 3 个组分构成,包括生态敏感性、生态恢复力和生态压力度要素.生态敏感性是区域内的生态系统应对外界干扰时的敏感程度;生态恢复力是生态系统在外界干扰后恢复到原状态或接近原状态的能力;生态压力度指外界对于区内生态系统的干扰强度.基于上述逻辑框架模型,并考虑数据可获得性,本研究最终选取 14 个指标用以构建长白山自然保护区生态脆弱性评估的指标体系(表 1).

1.3.2 评价指标的标准化与模型构建 为了避免生态指标由于量纲的差异对评价结果造成影响,本研究采用极差变换法对各指标进行标准化处理^[29].并基于 ArcGIS 空间分析功能,采用空间主成分分析(SPCA)的方法建立长白山自然保护区及其周边地区 2005 和 2015 年两期生态脆弱性指数(EVI)空间反演模型,具体方法参考 Zou 等^[5]的研究.

1.3.3 生态脆弱性的分级 通过上述构建的生态脆弱度空间反演模型,得到 2 期连续的生态脆弱度指标.参考国内外研究^[5,30],为了更好地评估长白山自

表 1 SRP 模型评价指标
Table 1 Assessment indicators from SRP model

框架 Frame	因子 Factor	指标 Indicator	
敏感性 Sensitivity	地形因子 Topographical factor	高程 Altitude 坡度 Slope 地形起伏度 Topographic undulation	
	地表因子 Ground surface factor	植被覆盖度 Vegetation coverage 土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity 土地利用类型 Land use type	
	气象因子 Meteorological factor	年均温 Mean annual temperature 年均降雨 Mean annual precipitation 年均相对湿度 Mean annual relative humidity	
	恢复力 Resilience	人类活动压力 Pressure of human activity	生境质量 Habitat quality 净第一性生产力 Net primary productivity
			人口密度 Population density 距离道路最近距离 The nearest distance from the road
			GDP 密度 GDP density

然保护区生态脆弱状况,采用自然断电法(NBC)将生态脆弱性(EVI)指标进一步分为5个等级:潜在脆弱性(Ⅰ)、微度脆弱性(Ⅱ)、轻度脆弱性(Ⅲ)、中等脆弱性(Ⅳ)和强烈脆弱性(Ⅴ)。

1.3.4 区域生态脆弱级数综合指数的计算 为了定量评估区域生态系统脆弱程度变化趋势,构建区域生态脆弱级数综合指数(SEVI),用于评估整个东北地区2005—2015年间生态系统脆弱程度的变化趋势,具体构建方法参考Li等^[31]。

1.3.5 地理探测器模型 为了进一步确定影响长白山自然保护区生态脆弱性空间格局及其变化的主要影响因素,本研究将2015和2005年的生态脆弱性指数以及两者之差作为因变量 Y ,对应的两个时期原始指标体系以及指标体系之差作为自变量 X ,利用地理探测器模型探究主要影响因素,统计量 q 表示自变量 X 对因变量 Y 空间分异的影响力, q 值越大,说明 X 对于 Y 空间格局的影响越大, P 值表示因子解释力, P 值越小,说明 X 对于 Y 的解释越好,具体方法参考Wang等^[32]的研究。

1.3.6 保护区内和区外对研究区整体生态脆弱性变化的贡献 为了定量评估保护区内、外对研究区整体生态脆弱性变化的贡献,本研究根据2005年各脆弱性等级Ⅰ和2015年各脆弱性等级Ⅱ所对应的得分 i 和 j ,构建以下模型:

$$C_{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i2015}A_{i2015} - P_{i2005}A_{i2005})}{St}$$

(1)

$$C_{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^m (P_{j2015}A_{j2015} - P_{j2005}A_{j2005})}{St}$$

(2)

$$C_a = \frac{C_{\alpha}}{C_{\alpha} + C_{\beta}} \times 100\%$$

(3)

$$C_b = \frac{C_{\beta}}{C_{\alpha} + C_{\beta}} \times 100\%$$

(4)

式中: C_a 和 C_b 分别为保护区内和区外的贡献百分比; C_{α} 和 C_{β} 分别为保护区内和区外生态脆弱性得分变量; n 和 m 分别表示保护区内和区外的等级数,本研究中 $n=m=5$; A_{i2005} 和 A_{j2005} 是保护区内、外2005年各脆弱性等级Ⅰ和Ⅱ所对应的区域面积; P_{i2005} 和 P_{j2005} 是保护区内、外2005年脆弱性等级Ⅰ和Ⅱ分别对应的得分 i 和 j ; A_{i2015} 和 A_{j2015} 是保护区内、外2015年各脆弱性等级Ⅰ和Ⅱ所对应的区域面积; P_{i2015} 和 P_{j2015} 是保护区内、外2015年脆弱性等级Ⅰ和Ⅱ分别对应的得分 i 和 j ; St 是保护区面积。

2 结果与分析

2.1 生态脆弱性空间反演模型构建

长白山自然保护区2005和2015年两个时期的空间主成分分析结果如表2所示,为确保所提取信息满足研究需要,对两个时期均选取前3个主成分作为本研究的评价指标。2005和2015年所获得的主成分的累积方差解释率分别达到82.6%和84.8%,说明模型满足要求。将每个时期各空间主成分及其对应的贡献百分比相乘后线性求和,构建两期生态

表2 长白山自然保护区及周边缓冲区2005和2015年空间主成分分析结果
Table 2 Results of spatial principal component analysis in Changbai Mountain Nature Reserve and its surrounding buffer in 2005 and 2015

主成分 Principal Component (PC)	2005			2015		
	特征值 Eigenvalue	贡献百分比 Percentage contribution (%)	累计贡献百分比 Cumulative percentage contribution (%)	特征值 Eigenvalue	贡献百分比 Percentage contribution (%)	累计贡献百分比 Cumulative percentage contribution (%)
PC1	3.350	49.0	49.0	3.622	52.4	52.4
PC2	1.789	26.2	75.2	1.784	25.8	78.2
PC3	0.506	7.4	82.6	0.458	6.6	84.8
PC4	0.408	6.0	88.6	0.435	6.3	91.1
PC5	0.293	4.3	92.9	0.207	3.0	94.1
PC6	0.183	2.7	95.6	0.147	2.1	96.2
PC7	0.145	2.1	97.7	0.121	1.8	98.0
PC8	0.095	1.4	99.1	0.072	1.0	99.0
PC9	0.040	0.6	99.7	0.037	0.5	99.5
PC10	0.023	0.3	100.0	0.019	0.3	99.8
PC11	0.005	0.1	100.0	0.007	0.1	99.9
PC12	0.001	0.0	100.0	0.004	0.1	100.0
PC13	0.001	0.0	100.0	0.000	0.0	100.0
PC14	0.000	0.0	100.0	0.000	0.0	100.0

脆弱性指数空间反演模型,具体公式如下:

$$EVI_{2005}=0.4897PC1_{2005}+0.2616PC2_{2005}+0.0739PC3_{2005}$$

(5)

$$EVI_{2015}=0.5240PC1_{2015}+0.2580PC2_{2015}+0.0662PC3_{2015}$$

(6)

2.2 保护区与周边缓冲区整体生态脆弱性等级的空间和数量特征

在空间上,长白山自然保护区及其周边缓冲区 2005 和 2015 年的生态脆弱性等级数均呈现出以天池为中心向北逐渐降低、向南先降低后升高的趋势(图 2).其中,潜在脆弱区域在两个时期全部都位于保护区北部和西部,微度脆弱区和轻度脆弱区均位于中部和西部的地区,中度脆弱区和强烈脆弱区主要位于天池周围地区和南部地区.而在周围缓冲区,生态脆弱性等级在空间上分布均匀,除了零星区域

等级较高外,大部分地区等级较低.

在数量上,长白山自然保护区内 2005 和 2015 年的生态脆弱性等级均以潜在脆弱性、微度脆弱性和中等脆弱性为主,这 3 个等级的面积占比之和分别达到 77.1%和 76.7%;而在保护区外,两个时期生态脆弱性等级在数量分布上同样以潜在脆弱性、微度脆弱性和轻度脆弱性为主,这 3 个等级的面积占比之和分别达到了 94.2%和 93.5%(表 3).说明长白山自然保护区及其周边缓冲区整体的生态脆弱状况良好.

2.3 保护区及周边缓冲区生态脆弱性的变化趋势

由表 3 可知,2005 和 2015 年保护区整体的生态脆弱级数综合指数分别为 1.92 和 1.95,说明整个长白山自然保护区及其周边缓冲区的生态脆弱性在 2005—2015 年间呈现出略微上升趋势.保护区内和区外对于整体生态脆弱性变化的贡献比分别为 30.8%和 69.2%,保护区外对于长白山整体生态脆弱性升高的贡献高于保护区内.

2005—2015 年间,保护区内外发生退化的区域面积为 1221 km²,其中,保护区内发生退化的区域面积为 254 km²,保护区外发生退化的面积达到

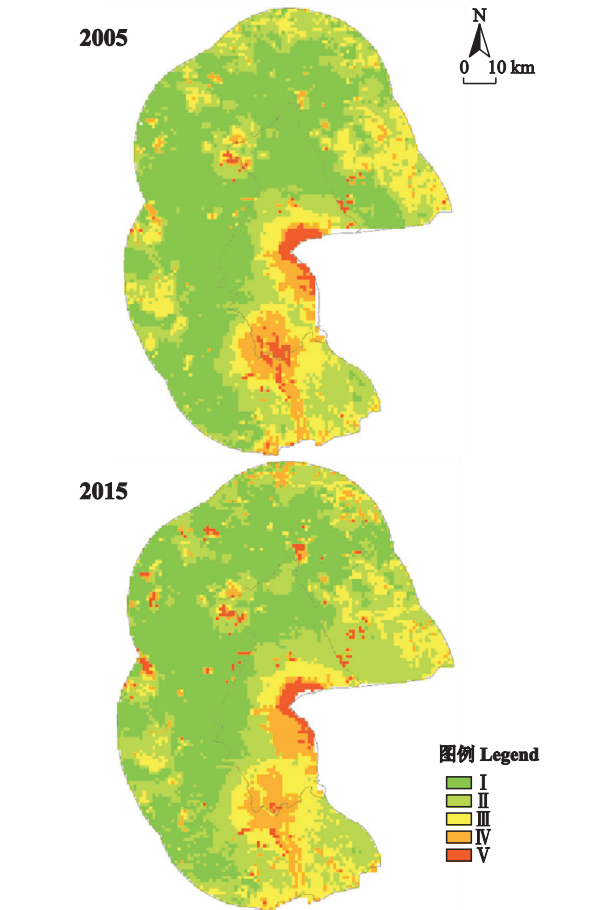


图 2 长白山自然保护区内外 2005 和 2015 年生态脆弱性等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological vulnerability gradation inside and outside the Changbai Mountain Nature Reserve in 2005 and 2015.

I : 潜在脆弱 Potential vulnerable; II : 微度脆弱 Slight vulnerable; III : 轻度脆弱 Light vulnerable; IV : 中等脆弱 Middle vulnerable; V : 强烈脆弱 Heavy vulnerable.

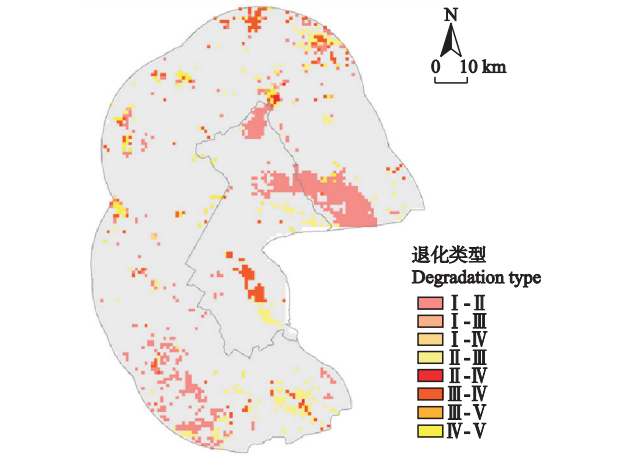


图 3 2005—2015 年长白山自然保护区内外生态退化的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of degradation pattern inside and outside the Changbai Mountain Nature Reserve from 2005 to 2015.

I - II : 由潜在脆弱退化微度脆弱 Degradation from potential vulnerability to slight vulnerability; I - III : 由潜在脆弱退化轻度脆弱 Degradation from potential vulnerability to light vulnerability; I - IV : 由潜在脆弱退化中度脆弱 Degradation from potential vulnerability to middle vulnerability; II - III : 由微度脆弱退化轻度脆弱 Degradation from slight vulnerability to light vulnerability; II - IV : 由微度脆弱退化中度脆弱 Degradation from slight vulnerability to middle vulnerability; III - IV : 由轻度脆弱退化中度脆弱 Degradation from light vulnerability to middle vulnerability; III - V : 由轻度脆弱退化强烈脆弱 Degradation from light vulnerability to heavy vulnerability; IV - V : 由中度脆弱退化强烈脆弱 Degradation from middle vulnerability to heavy vulnerability.

表 3 长白山自然保护内外在 2005 和 2015 年时生态脆弱性等级数量特征
Table 3 Quantitative characteristics of ecological vulnerability gradation inside and outside the Changbai Mountain Nature Reserve in 2005 and 2015

脆弱等级 Vulnerability level	2005					2015					区内外贡献占比 Contribution inside and outside the reserve(%)	
	区内面积 Area inside the reserve	区外面积 Area outside the reserve	总 SEVI Total SEVI	区内 SEVI SEVI inside the reserve	区外 SEVI SEVI outside the reserve	区内面积 Area inside the reserve	区外面积 Area outside the reserve	总 SEVI Total SEVI	区内 SEVI SEVI inside the reserve	区外 SEVI SEVI outside the reserve	区内 Inside the reserve	区外 Outside the reserve
	(km ²)	(km ²)				(km ²)	(km ²)					
I	658	3782	1.92	2.37	1.75	549	3521	1.95	2.42	1.84	30.8	69.2
II	462	2111				554	2495					
III	338	1317				358	1128					
IV	285	366				330	374					
V	149	75				113	121					

SEVI: 区域生态脆弱级数综合指数 Synthetic eco-environmental vulnerability index. I: 潜在脆弱 Potential vulnerable; II: 微度脆弱 Slight vulnerable; III: 轻度脆弱 Light vulnerable; IV: 中等脆弱 Middle vulnerable; V: 强烈脆弱 Heavy vulnerable.

967 km², 占整个退化面积的 77.7% (表 4). 区内和区外发生退化的主要类型均为由潜在脆弱退化为微度脆弱, 其面积占比分别达到 55.5% 和 57.8%, 说明研究期间保护区外发生于潜在脆弱区的生态状况恶化是造成整个区域生态脆弱性略微上升的主要原因. 由图 3 可知, 在空间上, 保护区内由潜在脆弱退化为微度脆弱的区域主要位于北部入口处和中部地区; 而在保护区外, 由潜在脆弱退化为微度脆弱的区域则主要位于东部地区.

表 4 保护区内外脆弱性上升区域的面积
Table 4 Increasing area of degradation inside and outside the reserve

退化类型 Degradation type	区内面积 Area inside the reserve	区外面积 Area outside the reserve
	(km ²)	(km ²)
I - II	141	559
I - III	0	8
I - IV	0	5
II - III	53	213
II - IV	0	7
III - IV	54	146
III - V	0	3
IV - V	6	72
总和 Total	254	967

I - II: 由潜在脆弱退化为微度脆弱 Degradation from potential vulnerability to slight vulnerability; I - III: 由潜在脆弱退化为轻度脆弱 Degradation from potential vulnerability to light vulnerability; I - IV: 由潜在脆弱退化为中度脆弱 Degradation from potential vulnerability to middle vulnerability; II - III: 由微度脆弱退化为轻度脆弱 Degradation from slight vulnerability to light vulnerability; II - IV: 由微度脆弱退化为中度脆弱 Degradation from slight vulnerability to middle vulnerability; III - IV: 由轻度脆弱退化为中度脆弱 Degradation from light vulnerability to middle vulnerability; III - V: 由轻度脆弱退化为强烈脆弱 Degradation from light vulnerability to heavy vulnerability; IV - V: 由中度脆弱退化为强烈脆弱 Degradation from middle vulnerability to heavy vulnerability.

3 讨 论

3.1 保护区内外生态脆弱性空间分异格局的驱动力分析

由表 5 可知, 两个时期保护区内部和外部的主要影响因子及其解释力表现出一定差异. 2005 年, 保护区内对生态脆弱性影响最大的 3 个主导因子依次为 NPP、土地利用类型和生境质量, 三者的因子解释力分别达到 0.834、0.797 和 0.507 ($P < 0.001$), 另外, 地形条件因子和土壤侵蚀因子也存在一定影响, 两者的解释力都在 0.4 左右, 植被覆盖度、气象条件等其他自然因子的影响相对较小, 这与郭泽呈等^[33]对于旱区生态脆弱性影响因子的研究结果不一致, 可能与所选研究区域的自然条件存在差异有关. 长白山属于湿润气候区, 气候适宜^[34], 该地区植被覆盖面积占比在 90% 以上^[35], 年均降水量、年均气温和植被覆盖率等因子在本研究所选的保护区尺度下的空间异质性明显低于上述几个驱动因子, 所以在空间上对于生态脆弱性的驱动效应明显偏弱; 而在保护区外部 30 km 缓冲区内, 主要驱动因子同样为 NPP、土地利用类型和生境质量, 但是地形因子和土壤侵蚀因子对于区域生态脆弱性的影响变得微弱, 这与长白山外围的地形条件与区内差异较大有关. 2015 年, 保护区内和周围缓冲区的生态脆弱性主要影响因子与 2005 年基本一致, 保护区内主要影响因子包括 NPP、土地利用类型、生境质量、土壤侵蚀和地形条件, 周围缓冲区则为 NPP、土地利用类型和生境质量. 研究期间, 保护区内外生态脆弱性空间格局变化所受的影响条件不同, 在保护区内, 其主要与 NPP、植被覆盖度、降雨、相对湿度和距离道路

表 5 长白山自然保护区原始指标体系的地理探测模型结果
Table 5 Geodetector model results of the original index system in Changbai Mountain Nature Reserve

影响因子 Impact factor	2005				2015				2000—2015			
	区内 q 值 q value inside reserve	P 值 P value	区外 q 值 q value outside reserve	P 值 P value	区内 q 值 q value inside reserve	P 值 P value	区外 q 值 q value outside reserve	P 值 P value	区内 q 值 q value inside reserve	P 值 P value	区外 q 值 q value outside reserve	P 值 P value
A	0.428	0.000	0.126	0.000	0.419	0.000	0.118	0.000	—	—	—	—
B	0.430	0.000	0.190	0.000	0.400	0.000	0.162	0.000	—	—	—	—
C	0.395	0.000	0.012	0.414	0.371	0.000	0.180	0.000	—	—	—	—
D	0.061	0.507	0.093	0.000	0.099	0.012	0.146	0.000	0.157	0.000	0.076	0.000
E	0.403	0.000	0.051	0.000	0.455	0.000	0.044	0.000	0.017	0.124	0.008	0.128
F	0.797	0.000	0.676	0.000	0.787	0.000	0.707	0.000	0.000	0.872	0.000	0.903
G	0.012	0.695	0.044	0.000	0.046	0.455	0.057	0.000	0.003	0.328	0.050	0.000
H	0.111	0.000	0.020	0.000	0.049	0.000	0.011	0.072	0.043	0.000	0.003	0.275
I	0.142	0.000	0.012	0.414	0.016	0.178	0.007	0.242	0.095	0.000	0.017	0.061
J	0.507	0.000	0.419	0.000	0.463	0.000	0.413	0.000	0.000	0.806	0.033	0.320
K	0.834	0.000	0.666	0.000	0.833	0.000	0.704	0.000	0.207	0.000	0.336	0.000
L	0.040	0.000	0.094	0.000	0.080	0.000	0.153	0.000	0.013	0.167	0.034	0.000
M	0.070	0.000	0.038	0.012	0.110	0.000	0.015	0.000	0.097	0.000	0.016	0.091
N	0.039	0.000	0.088	0.000	0.035	0.027	0.176	0.076	0.029	0.111	0.051	0.000

$q>0.5$ 的值加粗,意味着其对应的自变量对于因变量影响很大 The value of $q>0.5$ was coarsened, which meant the corresponding independent variable had a great influence on the dependent variable. A: 高程 Altitude; B: 坡度 Slope; C: 地形起伏度 Topographic undulation; D: 植被覆盖度 Vegetation coverage; E: 土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity; F: 土地利用类型 land use type; G: 年均温 Mean annual temperature; H: 年均降雨 Mean annual precipitation; I: 年均相对湿度 Mean annual relative humidity; J: 生境质量 Habitat quality; K: 净第一性生产力 Net primary productivity; L: 人口密度 Population density; M: 距离道路最近距离 The nearest distance from the road; N: GDP 密度 GDP density.

最短距离的空间格局变化有关;而在保护区外,则与 NPP、植被覆盖度、人口密度和 GDP 密度空间格局的变化有关,说明保护区内生态脆弱性的变化主要与自然条件的变化有关,而保护区外则与自然和人为条件的变化都有关系。

关于人类活动对于区域生态脆弱性的影响,本研究选择人口密度、距离道路最近距离和 GDP 密度 3 个指标。2005 年,保护区内 3 个指标的值依次为 0.040、0.070 和 0.039($P<0.001$),而保护区外围的缓冲区内,这 3 个指标依次为 0.094、0.038 和 0.088($P<0.001$),说明 2005 年,人类活动对于保护区内外各自的生态脆弱性整体影响很小,保护区外略高于保护区内。2015 年,保护区内与距离道路最近距离的 q 值超过了 0.1,说明就保护区内而言,尽管保护区内道路建设对于整个保护区内生态脆弱性的影响依然很小,但是研究期间道路建设对于区内生态脆弱性的驱动效应有微弱的增加趋势。本研究结果与其他相关研究有类似之处,如张建亮等^[36]以植被覆盖度作为评价指标,发现 2000—2010 年间长白山自然保护区内植被覆盖发生显著退化的区域占整个区域面积的 1.3%,他们将部分原因归因于 2008 年建设的穿插于长白山高山岳桦林和苔原带的南坡旅游公路以及 2009 年建设的位于北坡的旅游公路。而在保护

区外,人口密度和 GDP 密度的 q 值分别达到了 0.153 和 0.176($P<0.001$),相较于 2005 年有了数量级的增加,说明 2005—2015 年间,人类活动对于保护区周围缓冲区的生态脆弱性的影响在逐渐加大,这与研究期间保护区旅游活动的兴起有着直接关系。长白山景区的旅游人数从 21 世纪初的 20 万人次增长到 2010 年末的 244 万人次,旅游收入也大幅度增加,旅游人口的安置必然会导致周边地区土地利用的变化,进而影响到保护区周边生态脆弱状况。尽管目前人类活动对于保护区外部生态脆弱性状况的影响不大,但是其对于生态脆弱性的驱动效应的逐渐增强趋势应该值得保护区及周边地区管理人员的警惕。

3.2 研究结果的不确定性分析

本研究基于 SRP 逻辑框架模型,从生态敏感性、生态恢复力和生态压力度 3 个角度共选取 14 个指标评估指标用以评估长白山自然保护区内部的生态脆弱性状况。由于数据可获得性的原因,关于人类活动对于区内生态系统的压力指标,本研究只考虑了人口密度、GDP 密度和距离道路最短距离这 3 个普适性的指标,没有进一步细化关于人类活动的指标,使得研究无法进一步分析是哪些人为活动对保护区内的生态脆弱性造成了影响,这不利于将研究

结果应用于保护区环境管理的决策中。

4 结 论

2005—2015 年间,长白山自然保护区内和区外的生态脆弱性等级均以潜在脆弱、微度脆弱性和轻度脆弱为主,保护区及其周边地区生态脆弱状况总体处于较好水平;保护区内外整体的生态脆弱状况呈现出略微上升趋势,区内和区外发生退化的面积分别为 254 和 967 km²,退化类型主要为由潜在脆弱退化为微度脆弱,保护区内和区外对于区域整体生态脆弱性升高的贡献分别为 30.2% 和 69.8%;保护区内的生态脆弱性空间格局变化主要与 NPP、植被覆盖度和距离道路最近距离的变化有关,保护区外主要与 NPP、植被覆盖度和 GDP 密度的变化有关。

参考文献

- [1] Li J, Chen P, Ge Q, *et al.* Global change and human activities: Priorities of the global change research in next phase in China. *Advance in Earth Sciences*, 2005, **20**: 371–377
- [2] Xu G-C (徐广才), Kang M-Y (康慕宜), Li Y-F (李亚飞), *et al.* Advances in research on ecological vulnerability. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29** (5): 2578–2588 (in Chinese)
- [3] Young OR, Berkhout F, Gallopín GC, *et al.* The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. *Global Environmental Change: Human Policy Dimensions*, 2006, **16**: 304–316
- [4] Xie X-F (解雪峰), Wu T (吴涛), Xiao C (肖翠), *et al.* Ecological security assessment of the Dongyang River Watershed using PSR modeling. *Resources Science* (资源科学), 2014, **36** (8): 1702–1711 (in Chinese)
- [5] Zou TH, Yoshino, K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, 2017, **78**: 405–415
- [6] Li Y-H (李永化), Fan Q (范强), Wang X (王雪), *et al.* Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRPmodel: A case study in Chaoyang. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2015, **35** (11): 1452–1459 (in Chinese)
- [7] Liu Z-J (刘正佳), Yu X-X (于兴修), Li L (李蕾), *et al.* Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22** (8): 2084–2090 (in Chinese)
- [8] Ippolito A, Sala S, Faber JH, *et al.* Ecological vulnerability analysis: A river basin case study. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 3880–3890
- [9] Furlan A, Bonotto DM, Gumiere, SJ. Development of environmental and natural vulnerability maps for Brazilian coastal at Sao Sebastiao in Sao Paulo State. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **64**: 659–669
- [10] Huang PH, Tsai JS, Lin WT. Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: A case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **168**: 141–158
- [11] Zhao Y (赵毅), Xu X-K (徐绪堪), Li X-J (李晓娟). Evaluation of water environmental system vulnerability in Jiangsu Province based on weight-varying gray cloud model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2018, **27** (11): 2463–2471 (in Chinese)
- [12] Wang SY, Liu JS, Yang CJ. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. *Pedosphere*, 2008, **18**: 171–182
- [13] Hou P (侯鹏), Yang Y (杨旻), Cui J (崔俊), *et al.* Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern. *Geographical Research* (地理研究), 2017, **36** (3): 420–428 (in Chinese)
- [14] Xue D-Y (薛达元), Jiang M-K (蒋明康). A study on categoring standard of natrue reserves in China. *Chinese Environmental Science* (中国环境科学), 1994, **14** (4): 246–251 (in Chinese)
- [15] Liu J (刘静), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Miao H (苗鸿), *et al.* Sustainable development between protected areas and adjacent communities. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2010, **20** (8): 109–114 (in Chinese)
- [16] Miao J-Q (缪建群), Sun S (孙松), Wang Z-Q (王志强), *et al.* Evaluating the ecosystem services of Gaotianyan Nature Reserve in Lianhua County, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37** (19): 6422–6430 (in Chinese)
- [17] Xu G-C (徐广才), Kang M-Y (康慕宜), Metzger M, *et al.* Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32** (5): 1643–1653 (in Chinese)
- [18] Yu B-H (于伯华), Lyu C-H (吕昌河). Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau. *Geographical Research* (地理研究), 2011, **30** (12): 2289–2295 (in Chinese)
- [19] Hu B-Q (胡宝清), Jin S-L (金姝兰), Cao S-Y (曹少英), *et al.* Comprehensive evaluation of fragile Karst eco-environment in Guangxi Zhuang Autonomous Region based on GIS. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18** (1): 103–107 (in Chinese)
- [20] Cong L (丛林), Wang J-Z (王建中), Wang L-M (王立明), *et al.* The systematic diagnoses of the eco-vulnerability in the Daqinggou Nature Reserve. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (内蒙古农业大学学报), 2011, **32** (3): 46–52 (in Chinese)
- [21] MA Z-Z (马真臻), Wang Z-J (王忠静), Gu Y-L (顾

- 艳玲), *et al.* Ecological vulnerability assessment of nature reserve in arid region of northeast China: A case study of the Xihu Nature Reserve and the Suganhu Nature Reserve in Gansu. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2015, **35**(1): 253–259 (in Chinese)
- [22] Wang S-Y (王士远), Zhang X-X (张学霞), Zhu T (朱 彤), *et al.* Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology. *Progress in geography* (地理科学进展), 2016, **35**(10): 1269–1278 (in Chinese)
- [23] Yu J (于 健), Liu Q-J (刘琪璟), Xu Q-Q (徐倩倩), *et al.* Variation of vegetation index in response to climate change on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2015, **21**(2): 323–332 (in Chinese)
- [24] He L, Shen J, Zhang Y. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 2018, **206**: 1115–1125
- [25] Yu DY, Shi PJ, Han GY, *et al.* Forest ecosystem restoration due to a national conservation plan in China. *Ecological Engineering*, 2011, **37**: 1387–1397
- [26] Li M-M (李苗苗), Wu B-F (吴炳方), Yan C-Z (颜长珍), *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing. *Resources Science* (资源科学), 2004, **26**(4): 153–159 (in Chinese)
- [27] Sun W-Y (孙文义), Shao Q-Q (邵全琴), Liu J-Y (刘纪远). Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2014, **29**(3): 365–376 (in Chinese)
- [28] Chen Y (陈 妍), Qiao F (乔 飞), Jiang L (江磊). Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报: 自然科学版), 2016, **52**(3): 553–562 (in Chinese)
- [29] Tian C (田 超), Yang X-J (杨夏捷), Ju Y-H (鞠园华), *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in western Jilin Province. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2018, **25**(4): 298–303 (in Chinese)
- [30] Yao X (姚 雄), Yu K-Y (余坤勇), Liu J (刘健), *et al.* Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 735–745 (in Chinese)
- [31] Li AN, Wang AS, Liang SL, *et al.* Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*, 2006, **192**: 175–187
- [32] Wang JF, Li XH, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**: 107–127
- [33] Guo Z-C (郭泽呈), Wei W (魏 伟), Pang S-F (庞素菲), *et al.* Spatial-temporal evaluation and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2019, **39**(7): 1–15 (in Chinese)
- [34] Li M (李 明), Wang G-W (王贵文), Zhang L-Z (张莲芝). Drought characteristics analysis and the zoning based on standardized precipitation evapotranspiration index in Northeast China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2016, **30**(6): 65–70 (in Chinese)
- [35] Zhang C-C (张冲冲), Nan Y (南 颖), Zhao Y (赵洋). Study on vegetation classification Based on multi-temporal HJ-1 CCD data: The Changbai Mountain Area. *Geography and Geo-Information Science* (地理与地理信息科学), 2013, **29**(5): 41–46 (in Chinese)
- [36] Zhang J-L (张建亮), Liu F-Z (刘方正), Cui G-F (崔国发). Spatio-temporal variation of vegetation and analysis of its driving factors in Changbai Mountain National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(12): 3525–3536 (in Chinese)

作者简介 朱 琪,男,1992 年生,博士研究生.主要从事生态系统服务与生态安全格局优化研究. E-mail: qizhuahau@163.com

责任编辑 杨 弘