

# 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素

朱琪<sup>1,2</sup> 王亚楠<sup>1,2</sup> 周旺明<sup>1</sup> 周莉<sup>1</sup> 于大炮<sup>1</sup> 齐麟<sup>1,3\*</sup>

(<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>沈阳大学生物入侵研究中心, 沈阳 110044)

**摘要** 评估大尺度森林生态系统的脆弱状况对于维持区域生态安全及保证人类可持续发展具有重要意义。本研究以东北森林带为对象, 从自然和人为干扰两个角度出发选择 13 个指标构建生态脆弱性指标体系, 结合空间主成分分析法评估 2005 年和 2015 年两个时期生态脆弱性时空分布及其变化, 并分析其背后的主要驱动因素。结果表明: 东北森林带生态脆弱性等级以潜在脆弱性、微度脆弱性和轻度脆弱性为主; 生态脆弱性空间聚集效应明显, 脆弱性空间聚集以高-高聚集为主, 主要分布于东北森林带边界区域; 2005 年和 2015 年区域生态脆弱性指数分别为 2.339 和 2.450。生态脆弱状况呈现略微下降的趋势; 两个时期东北森林带生态脆弱性主要驱动因子依次为净第一性生产力、土地利用类型和生境质量。本研究为大尺度的森林生态系统保护及治理提供一定的理论基础和决策依据。

**关键词** 生态屏障; 生态脆弱性; 空间主成分; 地理探测器

**Spatiotemporal changes and driving factors of ecological vulnerability in Northeast China forest belt.** ZHU Qi<sup>1,2</sup>, Wang Ya-nan<sup>1,2</sup>, ZHOU Wang-ming<sup>1</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, YU Da-pao<sup>1</sup>, Qi Lin<sup>1,3\*</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Biological Invasion Research Center, Shenyang University, Shenyang 110044, China).

**Abstract:** Assessing the vulnerability of large-scale forest ecosystems is of great significance for maintaining regional ecological security and ensuring sustainable development of our society. In this study, we selected 13 indicators to construct the ecological vulnerability index system of Northeast China forest belt from the perspective of natural and anthropogenic disturbances. Combined with the spatial principal component analysis, we evaluated the spatial and temporal distribution and changes of ecological vulnerability in the forest belt in 2005 and 2015, and analyzed the main driving factors. The results showed that the ecological vulnerability of the forest belt was mainly potential vulnerability, slight vulnerability, and light vulnerability, with the ecological vulnerability at low level. The spatial aggregation effect of ecological vulnerability was strong and mainly comprised of high-high aggregation. Area with high-high aggregation was mainly distributed near the border of the forest belt. The regional ecological vulnerability index in 2005 and 2015 was 2.339 and 2.450, respectively, showing a slightly worse trend. The main driving factors of ecological vulnerability of the forest belt in the two periods were net primary productivity, land use type, and habitat quality. Our results provide a theoretical basis and decision-making basis for large-scale forest ecosystem protection and management.

**Key words:** ecological barrier; ecological vulnerability; spatial principal component; geodetector.

由国家重点研发计划项目(2018YFC0507305)资助。

收稿日期: 2021-05-03 接受日期: 2021-08-20

\* 通讯作者 E-mail: qilin@iae.ac.cn

近几十年来,在全球气候变化与人类活动的双重冲击下,全球范围内生态与环境问题大量涌现,生态系统自身的恢复能力和自净能力不断下降,呈现出越来越脆弱的趋势(Li *et al.*, 2005; Young *et al.*, 2006; 徐广才等 2009)。因此,有必要对区域生态系统脆弱状况进行科学的评估。生态脆弱性是指生态系统在特定时空尺度下对外界干扰的敏感反应与恢复能力,是生态系统自身的固有属性,受到人类与自然两方面的共同影响(卢亚灵等 2010),科学地评估生态脆弱性对于完善生态系统结构与功能,进而为受损生态系统的修复和保护提供科学依据,对于实现区域可持续发展具有重要意义。

评价方法的选择是生态脆弱性评估的关键一环(张学玲等 2018),现有的生态脆弱性评估方法已由初期操作简单但精度较低的定性评估逐渐发展为以指标体系与模型构建相结合的定量评估为主(杨飞等 2019),目前国内外学者在不同地区采用不同的定量方法开展了大量脆弱性评估研究。如 Ippolito 等(2010)采用模糊评价法评估意大利北部两个流域生态脆弱性的时空变化; Furlan 等(2011)利用综合评价法从地质、地形、土壤类型、植被与土地利用 4 个角度筛选评价指标并评估巴西海岸生态系统脆弱性; Huang 等(2010)采用层次分析法对所选 3 个指标设置先验权重来评估我国台湾中部地区某一流域的生态脆弱性; 郭泽呈等(2019)结合空间主成分分析法与地理探测器模型分析干旱区流域生态脆弱性时空变化及其动因。其中,主成分分析法作为客观定量分析法的一种,能够在信息不失真的前提下把由多个指标所组成的原始指标体系降维转化为数量较少且互相无关的主成分指标,很好地避免在选择指标时由于主观因素所引起的误差(郭泽呈等 2019)。此外,地理信息系统和遥感等相关技术的快速发展,使得利用主成分分析原理对多源空间数据集进行空间主成分分析(SPCA)成为了可能(Li *et al.*, 2006),因此,结合主成分分析原理和地理与遥感技术的方法成为进行区域生态脆弱性状况评估的一种重要手段。

除了评价方法的确外,指标体系的选择标准同样是生态脆弱性评估的重要方面(Beroya-Eitner, 2016),通过逻辑框架模型来选择具体研究区域的指标体系是常用的做法,已有的研究对这些逻辑框架模型背后的脆弱性机理理解略有差异,由此所选择的指标体系大致可分为“成因及结果表现”体系

(张龙生等 2013),“压力-状态-响应”体系(解雪峰等 2014),“多系统评价”体系(陈美球等 2003),“敏感度-恢复力-压力度”体系(李永化等 2015)等。其中,“成因及结果表现”体系基于生态脆弱性内涵,从自然条件本身及人为干扰两个方面出发选择指标,能够较好地评估人类与自然耦合系统的生态脆弱性,目前已经得到了广泛的应用(杨飞等, 2019)。

东北森林带是东北地区具有较高保护价值的森林区域,是“两屏三带”国家生态安全战略格局的重要组成部分(孙滨峰等 2018)。过去几十年间,在包括森林采伐、工农业活动等人为干扰以及全球气候变化的共同影响下,东北森林带内森林生态系统退化明显,影响到其生态功能的发挥进而危及区域生态安全。本研究根据东北森林带实际情况,从自然条件和人为干扰两个角度出发选取 13 个指标构建生态脆弱性评估体系,结合多源空间数据,采用空间主成分分析法定量评估 2005 年和 2015 年两个时期东北森林带生态脆弱性时空分布及其变化,并进一步分析其背后的驱动因子,以期为区域生态系统修复及环境管理提供理论指导。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区域

东北森林带位于我国东北部(118.48°E—134.22°E, 40.52°N—53.34°N),按行政区划包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区的部分区域(图 1),总面积约 61.6 万 km<sup>2</sup>,其中林地占比约 60%。带内山地、台地、丘陵等地貌类型广布,地势

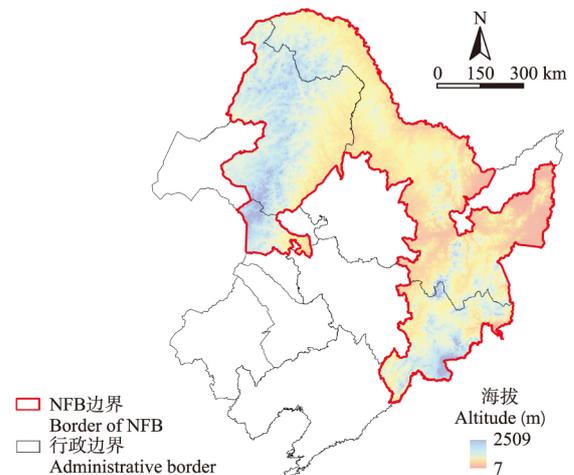


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of research region

起伏大,平均海拔约 445 m。东北森林带属于温带大陆性气候,冬季寒冷且漫长,1月平均最低气温低于-20℃,夏季气温较高,7月平均气温 18~20℃。东北森林带作为“两屏三带”国家生态安全格局的重要组成部分,对于维持东北地区生态安全具有重要作用。

## 1.2 数据来源与预处理

本研究所使用的数据覆盖 2005 年和 2015 年两个时期,主要包括气象数据、地形数据、土壤数据、道路数据、土地利用数据、社会经济与人口数据及其他数据 7 个类型,各类数据的来源、主要处理方法见表

表 1 数据来源及预处理

Table 1 Data source and processing

数据类型 Data type	变量 Variable	处理方法 Data product and processing	数据来源 Data source
气象数据	气温、降雨	克里金插值法	http://data.cma.cn/
地形数据	海拔、坡度、地形起伏度	数字高程模型(DEM)	http://www.resdc.cn
土壤数据	土壤质地	基于中国土壤质地数据集产品及 ArcGIS 10.5 空间分析模块提取	http://www.resdc.cn
	土壤有机质	克里金插值法	全国第二次土壤普查数据
道路数据	道路	基于全球道路开放数据集及 ArcGIS 10.5 空间分析模块提取	https://doi.org/10.7927/H4VD6WCT
土地利用数据	土地利用	基于中国土地利用数据集及 ArcGIS 10.5 空间分析模块提取	http://www.resdc.cn/
社会经济与人口数据	GDP 密度	基于中国 GDP 空间分布公里网格数据集及 ArcGIS 10.5 空间分析模块提取	http://www.resdc.cn/
	人口密度	基于中国人口空间分布公里网格数据集及 ArcGIS 10.5 空间分析模块提取	http://www.resdc.cn/
其他数据	净初级生产力	CASA 模型	https://search.earthdata.nasa.gov/
	植被覆盖度	像元二分模型	https://search.earthdata.nasa.gov/
	土壤侵蚀强度	通用土壤流失方程	http://www.resdc.cn/
	生境质量	InVEST 模型	http://data.cma.cn/

表 2 研究区生态脆弱性指标体系

Table 2 Ecological vulnerability evaluation index system of the study area

目标 Goal	维度 Dimension	因素 Factor	指标 Indicator	指标性质 Characteristic	
东北森林带生态脆弱性	自然影响	地形因子	高程	正向	
			坡度	正向	
		地形起伏度	正向		
		地表因子	植被覆盖度	正向	
			生境质量指数	正向	
	自然与人为共同影响	净第一性生产力	净第一性生产力	正向	
			土壤侵蚀强度	负向	
			土地利用类型	-	
		人为影响	气象因子	年均温	正向
				年均降雨	正向
		年均相对湿度	正向		
	社会经济因子	人口密度	负向		
		GDP 密度	负向		

1. 为了方便后续的计算,本研究将分辨率不同的多指标空间数据集统一重采样为 1 km×1 km,并将空间数据的投影设置为 UTM 投影(分度带 50N)。

## 1.3 研究方法

1.3.1 生态脆弱性指标选取 区域生态系统是自然与社会互相耦合的复杂系统,自然环境状况是区域生态脆弱性的基础条件,而人类活动则会缓解或加剧生态脆弱性(姚雄等,2016)。因此,本研究从自然和人为两个方面选取 13 个指标用以评价东北森林带生态脆弱性状况(表 2)。

1.3.2 指标标准化与评估模型建立 标准化:为避

免各指标量纲存在的差异对脆弱性评估结果产生影响,本研究采用极差变换法对各评价指标进行标准化处理(姚雄等,2016;王志杰等,2018)。

评估模型建立:为避免所选指标存在共线性问题,本研究采用空间主成分分析法(SPCA)构建 2 个时期东北森林带生态脆弱性(EVI)空间反演模型(Zou et al., 2017),并提取特征值大于 1 时所对应的主成分作为反演模型的评价指标(表 3)如下:

$$EVI_{2005} = 0.489 \times PC1_{2005} + 0.189 \times PC2_{2005} + 0.122 \times PC3_{2005} + 0.066 \times PC4_{2005} \quad (1)$$

$$EVI_{2015} = 0.507 \times PC1_{2015} + 0.182 \times PC2_{2015} + 0.135 \times PC3_{2015} + 0.062 \times PC4_{2015} \quad (2)$$

1.3.3 脆弱性等级划分与区域生态脆弱指数 为了更好地评估东北森林带内生态脆弱状况,本研究利用自然断点法将上述生态脆弱性指数(EVI)评估

表 3 东北森林带两个时期主成分分析结果

Table 3 Result of principal component analysis of Northeast China forest belt in 2005 and 2010

主成分 Principal component	2005 年 Year 2005			2015 年 Year 2015		
	特征值 Eigenvalue	贡献百分比 Contribution percentage	累计贡献百分比 Cumulative contribution percentage	特征值 Eigenvalue	贡献百分比 Contribution percentage	累计贡献百分比 Cumulative contribution percentage
1	9.777	48.9	48.9	10.673	50.7	50.7
2	3.780	18.9	67.8	3.822	18.1	68.8
3	2.444	12.2	80.0	2.839	13.5	82.3
4	1.331	6.6	86.6	1.291	6.2	88.5
5	0.872	4.4	91.0	0.823	3.9	92.4
6	0.727	3.6	94.7	0.688	3.3	95.7
7	0.438	2.1	96.8	0.425	2.0	97.7
8	0.316	1.5	98.4	0.240	1.1	98.8
9	0.135	0.7	99.1	0.132	0.6	99.5
10	0.080	0.4	99.5	0.080	0.4	99.9
11	0.078	0.3	99.9	0.015	0.1	100.0
12	0.010	0.0	99.9	0.006	0.0	100.0
13	0.007	0.0	100.0	0.005	0.0	100.0

结果划分为 5 个等级,依次为潜在脆弱性( 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 ),同时构建区域生态脆弱指数( SEVI)用于评估东北森林带整体的生态脆弱性( Li *et al.* 2006; 郭泽呈等 2019)。

**1.3.4 生态脆弱性空间聚集评估** 本研究通过空间统计分析评估东北森林带生态脆弱性空间聚集状况。参考王鹏等( 2018),本研究选择 5 km×5 km 网格作为评估的空间尺度。全局自相关通过全局莫兰指数表征,其反映了空间自相关的存在与否( 张荧楠等 2021),而局部自相关通过局部莫兰指数表征,其解释出现空间聚集的具体位置( 白永平等, 2012)。本研究通过 GeoDA 软件来计算并分析东北森林带生态脆弱性空间聚集状况( 张金茜等, 2018)。

**1.3.5 地理探测器模型** 地理探测器模型主要是用于探测指标空间分异性及其驱动力的一种新统计方法( 王劲峰等 2017),该模型主要用  $q$  值度量因子探测结果,其值越大说明自变量对于因变量空间分异的解释力越强,反之则越弱。本研究将 2005 年和 2015 年两个时期生态脆弱性指数及其差值作为因变量  $Y$ ,并将选取的指标体系作为自变量  $X$ ,采用自然断点法将自变量  $X$  由数值量变为类别量,基于 ArcGIS 10.5 随机提取 500 个均匀分布的点将自变量  $X$  与因变量  $Y$  匹配,通过因子探测分析,得到各自变量  $X$  对于因变量  $Y$  的影响力值( 郭泽呈等, 2019)。

## 2 结果与分析

### 2.1 东北森林带生态脆弱性等级时空分布特征

在空间上,东北森林带 2005 年和 2015 年两个时期生态脆弱性等级均表现出随着位置向森林带边界区域靠近,等级逐渐升高的趋势( 图 2)。两个时期,潜在脆弱区主要集中分布于森林带中部小兴安岭地区以及东部长白山区,微度脆弱区和轻度脆弱区主要集中分布于大兴安岭西部地区,而中度脆弱区和强脆弱区则主要分布于东北森林带与周边区域交界处。

在数量分布上,东北森林带 2005 年和 2015 年两个时期生态脆弱性等级以微度脆弱性为主,其次是潜在脆弱性( 表 4),这两个时期东北森林带潜在脆弱性、微度脆弱性和轻度脆弱性等级所在区域面积占整个东北森林带总面积的百分比总和分别达到了 77.7%和 73.5%,而就脆弱状况较差的两个等级来说,两个时期都是以中度脆弱性为主,面积占比分别为 21.2%和 21.5%,因此,整体上东北森林带的生态脆弱状况良好。

### 2.2 东北森林带生态脆弱性空间聚集性

东北森林带 2005 年和 2015 年两个时期区域全局莫兰指数分别为 0.486 和 0.518,呈现略微升高的趋势,整个区域内生态脆弱性指数表现出显著的正相关,说明东北森林带生态脆弱状况具有较强的空间聚集性,其分布具有空间分异性。由图 3 可知,从局部来看,2005 年和 2015 年两个时期生态脆弱性

表4 2005年和2015年东北森林带生态脆弱性等级数量特征

Table 4 Quantitative characteristics of ecological vulnerability grades in Northeast China forest belt in 2005 and 2015

生态脆弱性 Ecological vulnerability	2005年 Year 2005			2015年 Year 2015		
	面积 Area (km <sup>2</sup> )	面积占比 Area proportion (%)	区域 SEVI Regional SEVI	面积 Area (km <sup>2</sup> )	面积占比 Area proportion (%)	区域 SEVI Regional SEVI
I	157699	25.7	2.339	155244	25.3	2.450
II	232901	38.0		216898	35.3	
III	85963	14.0		79346	12.9	
IV	130046	21.2		132011	21.5	
V	6501	1.1		30489	5.0	

注: SEVI: 区域生态脆弱级数综合指数; I: 潜在脆弱; II: 微度脆弱; III: 轻度脆弱; IV: 中等脆弱; V: 强烈脆弱。

Note: SEVI: Synthetic eco-environmental vulnerability index. I: Potential vulnerable; II: Slight vulnerable; III: Light vulnerable; IV: Middle vulnerable; V: Heavy vulnerable.

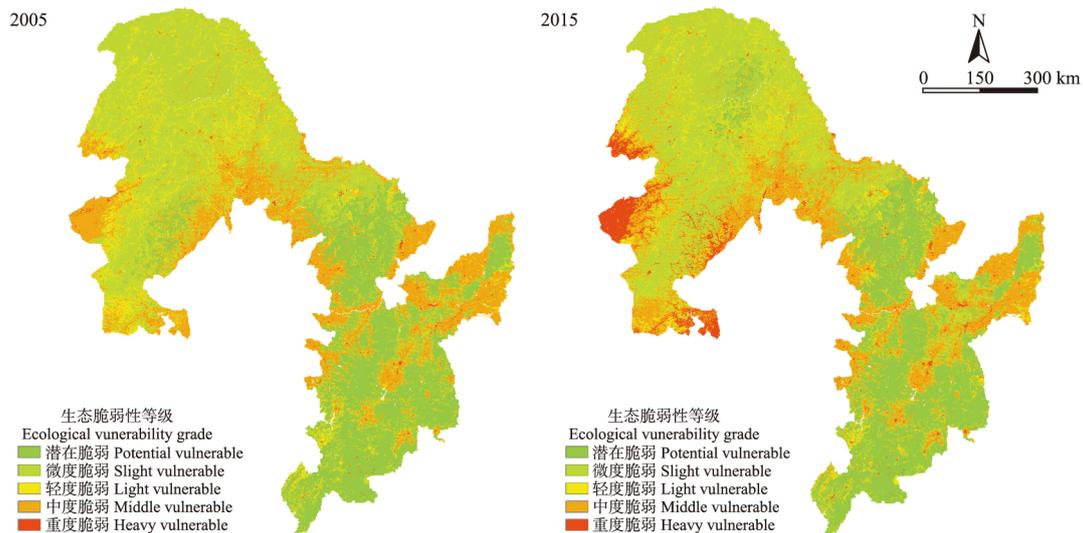


图2 2005年和2015年东北森林带生态脆弱性等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological vulnerability in Northeast China forest belt in 2005 and 2015

高-高聚集区主要分布在东北森林带边界地区,包括大兴安岭西部、南部和东部,小兴安岭西部及长白山北部地区,其余则零星分布于森林带内的其他地区,低-低区域则小范围分布于长白山北部区域。2005—2015年间,生态脆弱性空间聚集性逐渐增强。在空间上,高-高聚集区扩大主要发生于大兴安岭西部、南部及小兴安岭西部区域,由森林带边缘区域逐渐扩展至内部区域。

### 2.3 东北森林带生态脆弱性区域变化特征

东北森林带区域整体生态脆弱性指数(SEVI)在2005年和2015年两个时期分别为2.339和2.450(表4),说明这10年间东北森林带的整体生态脆弱状况略微下降。由表5可知,10年间,各生态脆弱性等级区域发生转移的总面积达到123454.15 km<sup>2</sup>,其中,潜在脆弱区、微度脆弱区和轻度脆弱区在10年间转移量与新增量差值明显高于其他两个等级的差值,表明脆弱区转移主要发生于这3个生态脆弱

状况较好的低等级地区。

东北森林带2005至2015年间生态脆弱性等级空间演变存在明显的空间异质性(图4)。大部分发生生态脆弱性等级跃升的区域集中分布于大兴安岭西部与南部地区,且这些地区的跃升等级以一级跃升为主;而生态脆弱性等级发生递减的区域则主要分布于两个地区,一是大兴安岭北部区域,二是小兴安岭的东北部区域。

### 2.4 东北森林带生态脆弱性空间分异格局驱动因素

由表6可知,2005年和2015年两个时期绝大部分指标对于东北森林带生态脆弱性的解释力充足( $P < 0.05$ ),说明本研究所构建的指标体系是合理的。东北森林带生态脆弱性空间分异格局受到自然因素和人类活动因素的影响。2005年,对东北森林带生态脆弱性影响最大的3个因子依次为净第一性生产力、土地利用类型和生境质量,三者的解释力分

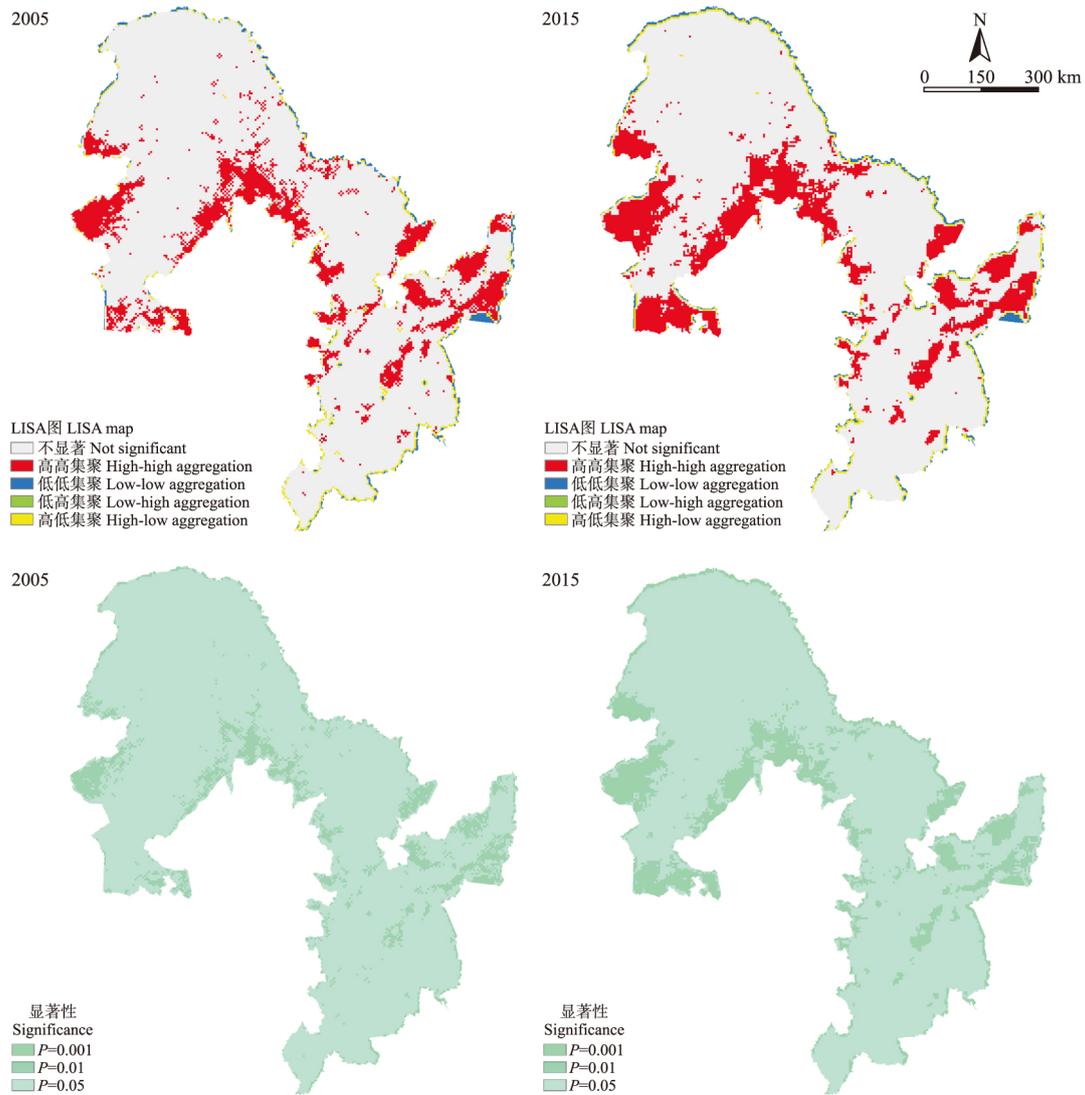


图 3 2005 年和 2015 年东北森林带生态脆弱性 LISA 图和显著性图  
Fig.3 LISA and significance maps of ecological vulnerability of Northeast China forest belt in 2005 and 2015

表 5 东北森林带生态脆弱性等级面积转移矩阵 (km<sup>2</sup>)  
Table 5 Area transfer matrix of ecological vulnerability grade in Northeast China forest belt

		2015 年 Year 2015					2005 年转移量 Transfer in 2005	总计 Total
		I	II	III	IV	V		
2005 年 Year 2005	I	140214.96	18445.65	1071.62	592.39	64.25	20173.91	160388.87
	II	15965.69	195584.04	20631.66	3051.62	234.99	39883.97	235468.00
	III	791.94	4391.97	46032.01	27178.94	799.51	33162.36	79194.36
	IV	414.76	1321.58	5263.97	101611.47	22894.19	29894.50	131505.98
	V	10.93	14.01	17.64	296.83	5159.10	339.41	5498.51
2015 年新增量 Increment in 2015		17183.32	24173.22	26984.89	31119.77	23992.94	123454.15	-
总计 Total		157398.27	219757.26	73016.89	132731.24	29152.04	-	612055.72

注: I: 潜在脆弱; II: 微度脆弱; III: 轻度脆弱; IV: 中等脆弱; V: 强烈脆弱。

Note: I: Potential vulnerable; II: Slight vulnerable; III: Light vulnerable; IV: Middle vulnerable; V: Heavy vulnerable.

别为 0.869、0.826 和 0.445 ( $P < 0.001$ ) ,其他因子对于东北森林带生态脆弱性的影响相对较小 ,这些因

子的解释力由高到低排列依次为地形因子、地表因子和气象因子 ,人口密度和 GDP 密度等人类活动因

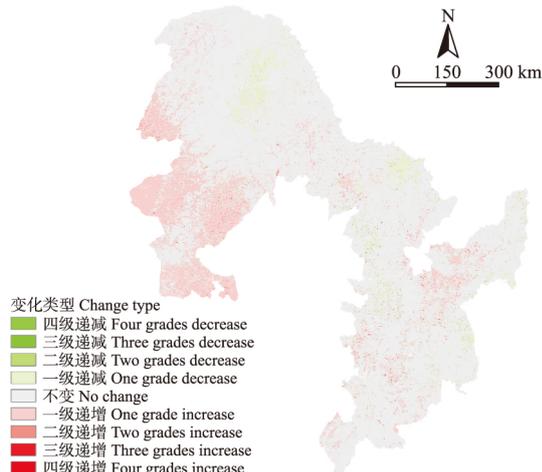


图4 东北森林带生态脆弱性等级演变格局  
Fig.4 Evolution pattern of ecological vulnerability grade in Northeast China forest belt

表6 地理探测器解释因子结果

Table 6 Geodetector model results of the original index system in Northeast China forest belt

	2005年 Year 2005			2015年 Year 2015		
	<i>q</i>	<i>P</i>	排名	<i>q</i>	<i>P</i>	排名
1	0.127	0	7	0.072	0	9
2	0.200	0	6	0.166	0	7
3	0.284	0	4	0.234	0	5
4	0.223	0	5	<b>0.361</b>	0	4
5	0.037	0.71	-	0.092	0.08	-
6	<b>0.826</b>	0	2	<b>0.746</b>	0	2
7	0.025	0.04	10	0.050	0	10
8	0.122	0	8	0.167	0	6
9	0.102	0	9	0.138	0	8
10	<b>0.445</b>	0	3	<b>0.371</b>	0	3
11	<b>0.869</b>	0	1	<b>0.854</b>	0	1
12	0.028	0.99	-	0.000	0.99	-
13	0.010	0.99	-	0.022	0.13	-

注: 1~13: 依次对应13个原始指标。1: 高程; 2: 坡度; 3: 地形起伏度; 4: 植被覆盖度; 5: 土壤侵蚀强度; 6: 土地利用类型; 7: 年均温; 8: 年均降雨; 9: 年均相对湿度; 10: 生境质量; 11: 净第一性生产力; 12: 人口密度; 13: GDP密度。

Note: 1: Altitude; 2: Slope; 3: Topographic undulation; 4: Vegetation coverage; 5: Soil erosion intensity; 6: land use type; 7: Mean annual temperature; 8: Mean annual precipitation; 9: Mean annual relative humidity; 10: Habitat quality; 11: Net primary productivity; 12: Population density; 13: GDP density.

子对于东北森林带生态脆弱性的影响并不显著。相较于2005年,2015年东北森林带生态脆弱性的主要影响因子一致,但是这些影响因子对于生态脆弱性的影响排名略有差异。

### 3 讨论

#### 3.1 东北森林带生态脆弱性成因比较

自然因素是影响区域生态脆弱性的成因之一

(姚雄等,2016)。本研究发现,东北森林带生态脆弱性空间分异格局主要受到地形因子、地表因子和气象因子驱动,其中净第一性生产力与生境质量是对生态脆弱性影响最大的两个自然指标。我们的主要结果与前人研究存在差异。王茜等(2021)分析了滇东喀斯特区域生态脆弱性的影响因素,发现岩性和石漠化面积是其主要的自然影响因素;李路等(2021)对新疆喀什地区生态脆弱性时空演变及其背后驱动因子进行分析后认为,气温、地形和植被覆盖度是引起该地区生态脆弱性空间分异的主要自然因素;张学渊等(2021)对西北干旱区生态脆弱性进行评估并分析其主要驱动因子,发现土壤及气候因子是该区域生态脆弱性空间格局分布的主要驱动因子,而植被覆盖度、土地覆盖类型等其他因子影响较小,造成上述差异的主要原因可能与所选择研究区域的自然条件存在差别有关。相较于西北干旱区或者西南喀斯特地区,东北森林带所在区域气候湿润,土壤条件较好,气候因子与土壤因子的空间分异性没有西北地区及喀斯特地区显著,因而这些因子对于东北森林带生态脆弱性的驱动力较小。

除了自然因素,还有人类活动干扰(余坤勇等,2012)。土地利用类型的变化体现了人类对于自然的改造,是影响生态脆弱性的关键因素之一(高志强等,1999)。本研究表明,东北森林带受到土地利用类型的显著影响,这可能与东北森林带内耕地面积不断扩张有关,说明人类活动对于东北森林带影响的范围正在逐渐增大,这个趋势值得当地管理人员警惕。因此,当地政府应从政策制度上完善健全,协调东北森林带地区农业生产等经济活动与生态脆弱性治理的平衡,采取正确、适当的措施与方法抑制东北森林带生态脆弱下降的趋势。

#### 3.2 不确定性分析

区域生态脆弱性评估具有复杂性、综合性和不明确性等特点(郭泽呈等,2019)。本研究基于“成因及结果表现”指标体系框架,从自然本身和人为干扰两个方面出发,选择13个指标用于构建评估东北森林带生态脆弱性的指标体系。然而,由于数据可获得性的原因,就人为干扰影响的指标而言,本研究只考虑了GDP密度和人口密度两个宏观反映人类经济活动的指标,并没有进一步设置指标考察具体是哪些人类干扰活动影响东北森林带生态脆弱性时空格局及其演变,这不利于该模型在具体实践中的应用。在接下来的研究中,数据来源以及指标体

系的建立需要进一步优化。

#### 4 结 论

2005 年和 2015 年,东北森林带生态脆弱状况总体处于较好水平,两个时期生态脆弱性等级以潜在脆弱性、微度脆弱性和轻度脆弱性为主;研究区生态脆弱性空间聚集效应强烈,脆弱性空间聚集以高-高聚集为主,主要分布于大兴安岭西部、南部、小兴安岭西部以及长白山区北部地区;2005—2015 年间,东北森林带整体的生态脆弱状况呈现略微下降的趋势;东北森林带生态脆弱性空间分异格局的主要驱动因子依次为净第一性生产力、土地利用类型和生境质量。

#### 参考文献

白永平,王培安. 2012. 浙江省集聚经济类型的资源配置效应分析. *资源科学*, **34**(3): 510-519. [Bai YP, and Wang PA. 2012. Agglomerative economies' effects on resources allocation in Zhejiang Province. *Resource Science*, **34**(3): 510-519.]

陈美球,蔡海生,赵小敏,等. 2003. 基于 GIS 的鄱阳湖区脆弱生态环境的空间分异特征分析. *江西农业大学学报(自然科学版)*, **25**(4): 523-527. [Chen MQ, Cai HS, Zhao XM, et al. 2003. On spatial differential features of fragile eco-environment in Poyang Lake Area under GIS. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Science)*, **25**(4): 523-527.]

高志强,刘纪远,庄大方. 1999. 基于遥感和 GIS 的中国土地利用/土地覆盖的现状研究. *遥感学报*, **3**(2): 134-138. [Gao ZQ, Liu JY, Zhuang DF. 1999. The research of Chinese land-use/land-cover present situations. *Journal of Remote Sensing*, **3**(2): 134-138.]

郭泽呈,魏 伟,庞素菲,等. 2019. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例. *生态学报*, **39**(7): 1-14. [Guo ZC, Wei W, Pang SF, et al. 2019. Spatio-temporal evolution 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*, **39**(7): 1-14.]

李 路,孙桂丽,陆海燕,等. 2021. 喀什地区生态脆弱性时空变化及驱动力分析. *干旱区地理*, **44**(1): 277-288. [Li L, Sun GL, Lu HY, et al. 2021. Spatial-temporal variation and driving forces of ecological vulnerability in Kashi Prefecture. *Arid Land Geography*, **44**(1): 277-288.]

李永化,范 强,王 雪,等. 2015. 基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例. *地理科学*, **35**(11): 1452-1459. [Li YH, Fan Q, Wang X, et al. 2015. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRP Model: A case study in Chaoyang County. *Geographical Sciences*, **35**(11): 1452-

1459.]

卢亚灵,颜 磊,许学工. 2010. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析. *资源科学*, **32**(2): 303-308. [Lu YL, Yan L, and Xu XG. 2010. Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai Rim Region. *Resources Science*, **32**(2): 303-308.]

孙滨峰,赵 红,逯 非,等. 2018. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. *生态学报*, **38**(14): 4975-4983. [Sun BF, Zhao H, Lu F, et al. 2018. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(14): 4975-4983.]

王劲峰,徐成东. 2017. 地理探测器:原理与展望. *地理学报*, **72**(1): 116-134. [Wang JF, Xu CD. 2017. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, **72**(1): 116-134.]

王 茜,赵筱青,普军伟,等. 2021. 滇东南喀斯特区域生态脆弱性时空演变与影响因素. *应用生态学报*, **32**(6): 2180-2190. [Wang Q, Zhao YQ, Pu JW, et al. 2021. Spatial-temporal variations and influencing factors of eco-environment vulnerability in the karst region of Southeast Yunnan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **32**(6): 2180-2190.]

王 鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 2018. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价——以宁夏红寺堡区为例. *生态学报*, **38**(8): 2672-2682. [Wang P, Wang YJ, Liu XP, et al. 2018. Ecological risk assessment of an ecological migrant resettlement region based on landscape structure: A case study of Hongsibu in Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(8): 2672-2682.]

王志杰,苏 嫒. 2018. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析. *生态学报*, **38**(2): 432-442. [Wang ZJ, Su C. 2018. Analysis of eco-environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the south-to-north water transfer project, China. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(2): 432-442.]

解雪峰,吴 涛,肖 翠,等. 2014. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价. *资源科学*, **36**(8): 1702-1711. [Xie XF, Wu T, Xiao C, et al. 2014. Ecological security assessment of the dongyang river watershed using PSR Modeling. *Resource Science*, **36**(8): 1702-1711.]

徐广才,康慕谊,贺丽娜,等. 2009. 生态脆弱性及其研究进展. *生态学报*, **29**(5): 2578-2588. [Xu GC, Kang MY, He LN, et al. 2009. Advances in research on ecological vulnerability. *Acta Ecologica Sinica*, **29**(5): 2578-2588.]

杨 飞,马 超,方华军. 2019. 脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践. *生态学报*, **39**(2): 441-453. [Yang F, Ma C, Fang HJ. 2019. Research progress on vulnerability: From theoretical research to comprehensive practice. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(2): 441-453.]

姚 雄,余坤勇,刘 健,等. 2016. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变. *应用生态学报*, **27**(3): 735-745. [Yao X, Yu KY, Liu J, et al. 2016. Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **27**(3): 735-745.]

- 余坤勇, 刘健, 许章华. 2012. 福建永安市林地脆弱性遥感测定研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), **40**(12): 49-56. [Yu KY, Liu J, Xu ZH. 2012. Remote sensing based fragilities of forestlands in Yong'an City, Fujian Province. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, **40**(12): 49-56.]
- 张金茜, 巩杰, 马学成, 等. 2018. 基于 GeoDA 的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性. 生态学杂志, **37**(5): 1476-1483. [Zhang JQ, Gong J, Ma XC, et al. 2018. GeoDA-based spatial correlation analysis of landscape fragmentation in Bailongjiang Watershed of Gansu. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(5): 1476-1483.]
- 张龙生, 李萍, 张建旗. 2013. 甘肃省生态环境脆弱性及其主要影响因素分析. 中国农业资源与区划, **34**(3): 55-59. [Zhang LS, Li P, Zhang JQ. 2013. Analysis of ecological vulnerability and its major influencing factors in Gansu Province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, **34**(3): 55-59.]
- 张学玲, 余文波, 蔡海生, 等. 2018. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述. 生态学报, **38**(16): 5970-5981. [Zhang XL, Yu WB, Cai HS, et al. 2018. Review of the evaluation methods of regional eco-environmental vulnerability. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(16): 5970-5981.]
- 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 2021. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析. 生态学报, **41**(12): 1-13. [Zhang XY, Wei W, Zhou L, et al. 2021. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, **41**(12): 1-13.]
- 张荧楠, 张兰婷, 韩立民. 2021. 农业生态效率评价及提升路径研究——基于山东省 17 个地级市的实证分析. 生态经济, **37**(4): 118-124+131. [Zhang YN, Zhang LT, Han LM. 2021. Study on the evaluation and promotion path of agricultural ecological efficiency: An empirical analysis of 17 prefecture level cities in Shandong Province. *Ecological Economy*, **37**(4): 118-124+131.]
- Beroya-Eitner MA. 2016. Ecological vulnerability indicators. *Ecological Indicators*, **60**: 329-334.
- Furlan A, Bonotto DM, Gumiere SJ. 2011. Development of environmental and natural vulnerability maps for Brazilian coastal at Sao Sebastiao in Sao Paulo State. *Environmental Earth Sciences*, **64**: 659-669.
- Huang PH, Tsai JS, Lin WT. 2010. 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*, **168**: 141-158.
- Ippolito A, Sala S, Faber JH, Vighi M. 2010. Ecological vulnerability analysis: A river basin case study. *Science of the Total Environment*, **408**: 3880-3890.
- Li AN, Wang AS, Liang SL, et al. 2006. 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*, **192**: 175-187.
- Li J, Chen P, Ge Q, Fang X. 2005. Global change and human activities: Priorities of the global change research in next phase in China. *Advance in Earth Sciences*, **20**: 371-377.
- Young OR, Berkhout F, Gallopin GC, et al. 2006. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, **16**: 304-316.
- Zou TH, Yoshino K. 2017. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, **78**: 405-415.

---

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 张敏

---

朱琪,王亚楠,周旺明,周莉,于大炮,齐麟. 2021. 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素. 生态学杂志, **40**(11): 3474-3482.

Zhu Q, Wang YN, Zhou WM, Zhou L, Yu DP, Qi L. 2021. Spatiotemporal changes and driving factors of ecological vulnerability in Northeast China forest belt. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(11): 3474-3482.