

DOI: 10.5846/stxb201711061982

陈妮, 鲁莎莎, 关兴良. 北京市森林生态安全预警时空差异及其驱动机制. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Chen N, Lu S S, Guan X L. Spatio-temporal differences and the driving mechanism of early warnings of forest ecological security in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

北京市森林生态安全预警时空差异及其驱动机制

陈 妮¹, 鲁莎莎^{1,*}, 关兴良²

¹ 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

² 全国市长研修学院, 北京 100029

摘要: 主要探讨森林生态安全预警指数演化的时空格局变化及其驱动力机制, 以期为推进北京市森林生态安全决策提供理论参考。基于森林生态安全预警指标体系, 运用 SD 模型从区县尺度对北京市 2009—2015 年森林生态安全预警的时空差异进行分析, 并对 2015—2030 年森林生态安全演变趋势进行预测。结果表明: (1) 2009—2030 年, 北京市森林生态安全整体呈改善态势。其中, 2009—2015 年, 北京市森林生态安全预警指数呈略有下降态势, 但下降速度有限; 2016—2030 年, 预警指数呈上升趋势。(2) 各区县内部差异显著, 5 个区县的森林生态安全预警指数有所下降, 其中海淀区下降幅度最大。2016—2030 年, 各区县中除海淀区外, 预警指数均小幅上升, 森林生态安全状况有所改善; 但石景山区仍为巨警, 海淀和朝阳区为重警。(3) 空间上, 森林生态安全预警指数从功能拓展区到城市发展新区及生态涵养区, 呈现出由低到高的变化趋势, 其低值区随着城市化进程的加快而逐渐扩大。生态涵养区的森林生态安全状况明显优于其他地区, 发展新区的森林生态安全改善显著, 功能区个别地区则有退化迹象。(4) 北京市森林生态安全预警指数时空演变特征主要受森林资源、社会经济、自然环境和林业政策等多种因素的综合影响, 因而出现森林生态安全演进的阶段性及其区域性差异。

关键词: 森林生态安全; 预警; SD 模型; 驱动机制; 北京市

Spatio-temporal differences and the driving mechanism of early warnings of forest ecological security in Beijing

CHEN Ni¹, LU Shasha^{1,*}, GUAN Xingliang²

¹ School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² National Academy for Mayors of China, Beijing 100029, China

Abstract: In this study, we analyzed the spatio-temporal pattern changes and the dynamic mechanism of evolution as a warning index of forest ecological security, to provide a theoretical reference for decision-making in forestry ecological security in Beijing. This study focused on the establishment of an index system as a warning for forestry ecological security. By analyzing spatio-temporal differences from 2009 to 2015 through SD models, a prediction of the evolutionary trend for the ecological security of the forest from 2015 to 2030 was made. The results indicate that: (1) Forestry ecological security will improve from 2009 to 2030 overall. The warning index decreased slightly from 2009 to 2015, but will increase from 2016 to 2030 as predicted. (2) The early warning index decreased significantly in all the five counties and districts, with the Haidian District presenting the sharpest drop. From 2016 to 2030, with the exception of Haidian District, a slight increase can be seen, which shows that ecological security has improved. However, early warnings in the Shijingshan District are still at high levels, and the Haidian and Chaoyang Districts have a severe warning. (3) Spatially, the early warning index

基金项目: 北京市社会科学基金项目 (16SRB011); 教育部人文社科研究项目 (14YJCZH106); 北京市自然科学基金项目 (9184035)

收稿日期: 2017-11-06; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sasafly0505@163.com

demonstrates an upward trend from city function extension zones to new urban development zones followed by ecological conservation zones, and the low index range increasingly expands with urbanization. The security conditions in ecological conservation zones are much better than those in other areas. The early warning index has improved in new urban development zones but has declined in some parts as a function of the extension zone. (4) The spatio-temporal evolution features of the early warning index of forest ecological security in Beijing are significantly affected by many factors, such as forestry resources, social economy, natural environment, and forestry policy, which results in the periodicity and the regional differences of the evolution of forest ecological security.

Key Words: forest ecological security; the early warning; SD model; driving mechanism; Beijing

生态安全预警是指通过对生态系统破坏、环境污染和资源消耗等警兆进行识别,以及分析警源的变化,采用定性和定量相结合的预警模型提前对某种隐蔽存在或突发性警情进行预报^[1],以达到提前预防和控制不安全因素的目的^[2],对生态安全的维护具有重要意义,引起了国内外学者的关注。国外的生态安全预警评价主要集中在生态风险评价^[3]和生态系统稳定性评价^[4]两方面,评价模型主要有 PSR^[3]、DPSEEA^[5]和 ECCO^[6],已具有较为完整的概念体系和系统的操作方法。相对而言,国内的相关研究起步较晚,始于 20 世纪 90 年代后期,研究内容涉及水系统承载力监测与预警^[7]、土地生态安全状态预警^[8]、湿地系统分析和预测^[9]等方面;研究尺度涉及城市^[10]、旅游地^[11]及自然保护区^[12]等方面。在预测预警方法上,灰色 GM(1,1)模型^[13]、能值分析^[14]、BP 神经网络^[15]等方法在生态安全领域均有应用。目前,关于森林生态安全预警的研究尚处在发展阶段,学术界为促进该领域的发展开展了相应的研究。譬如,毛旭鹏等^[16]基于 PSR 模型,采用 BP 神经网络对长株潭森林生态安全进行预警研究,预测 2012-2014 年森林生态安全状况都将处于“轻警”状态。

总的来说,生态安全预警相关研究取得了积极进展,但针对森林生态安全预警的研究尚存在诸多不足:(1)基于 SD 模型的森林生态安全预警研究理论体系尚未构建;(2)实例研究中很少综合运用数理模型及地理信息系统(GIS)等空间分析技术;(3)缺乏开展森林生态安全预警动态监测、预警演变及调控、驱动力机制的综合性研究;(4)已有研究大多集中在区域尺度,很少涉及区县,对森林生态安全预警的区域内部差异分析则更少,无法为一个区域制定差异化的政策提供支撑。为此,本文以国际大都市北京为例,尝试运用 SD 模型对其森林生态安全的发展趋势进行预测预警分析,并从综合视角考察其驱动机制,以期丰富森林生态安全研究的相关方法和模型,为促进北京森林生态环境建设与林业可持续发展提供支持。

1 研究方法

1.1 森林生态安全预警系统仿真模型构建

1.1.1 系统仿真模型因果反馈图的构建

森林生态安全预警系统是由若干个内部关系错综复杂、相互联系紧密的子系统所组成的森林—社会经济—环境复合系统。本研究根据森林生态安全预警系统各子系统的相互影响、相互作用的关系,研究 SD 模型因果关系流程图,并在此基础上,建立森林生态安全仿真预警模型的因果反馈流程图(图 1),子系统因果反馈流程图参见鲁莎莎等人^[17]研究。

1.1.2 系统仿真模型参数设定

模型中的参数选取依据统计数据来确定,其中人口增长率、森林蓄积量增长率、工业污染治理系数、环保投资系数等较为稳定的指标,按照历史数据 2009—2015 年间的算术平均值加以确定;而变量间关系不明显或随时间变化的变量采用表函数的方式予以定义,如人均 GDP、对环境的社会关注度等。本文使用的森林资源数据来源于 2010—2016 年的首都园林绿化政务网和《第八次森林资源清查》;社会经济数据来源于《北京市统计年鉴》和《北京区域统计年鉴》;气象统计数据来源于《北京市环境保护局环境状况公报》;其他相关数据来源于相关文献资料、文件以及研究报告。

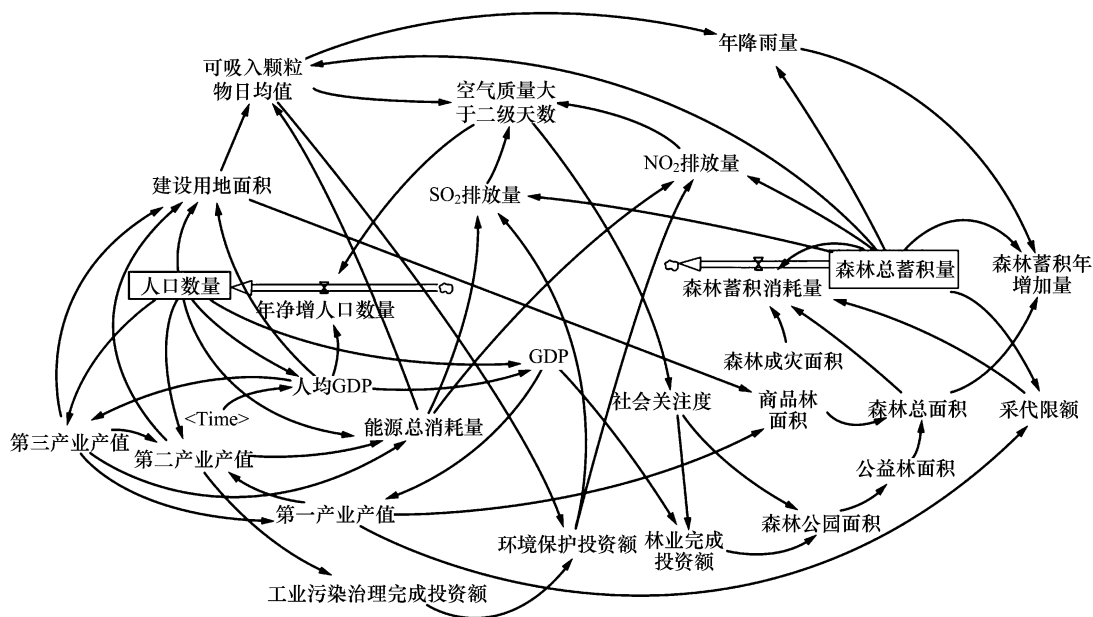


图1 森林生态安全系统仿真预警模型的因果反馈流程图

Fig.1 The causal feedback flowchart of simulation warning model for forest ecological security system

1.1.3 系统仿真模型检验

为了验证模型的运算结果与客观实际的吻合程度,运用北京市生态安全预警的历史数据(2009—2015年)对模型进行检验(图2)。首先选取3个子系统主要状态变量作为检验参数,参数分别为年末人口数量、森林总蓄积量和空气质量二级以上天数;然后以2009年为基准年,1年时间为步长,模拟2009—2015年主要变量值;最后对比分析模拟数据与实际数据并计算相对误差。通过比较可知,模拟数值与实际数值误差小于10%,符合一致性要求,因此用此模型来预测2016—2030年北京市森林生态安全预警数据是较为可靠的。

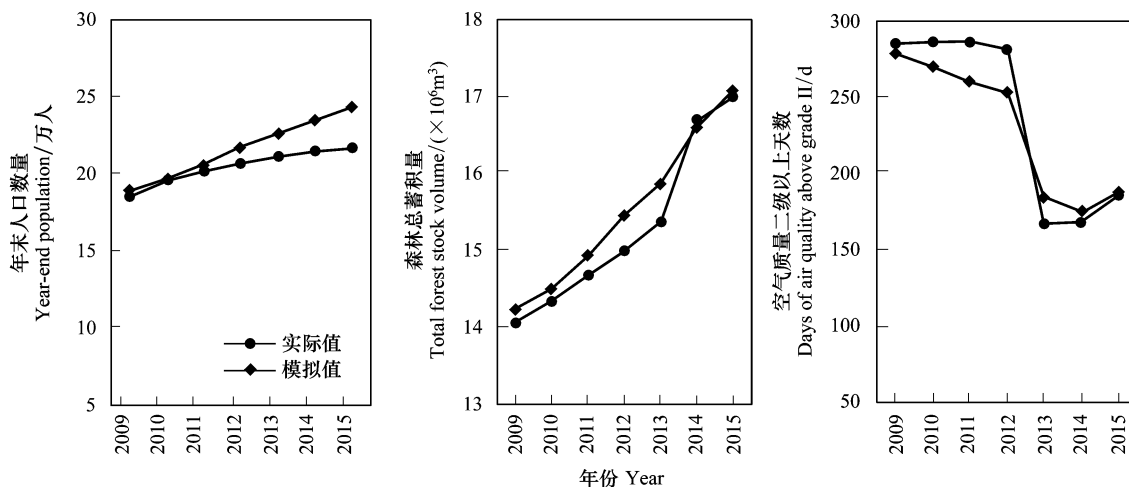


图2 参数校正检验图

Fig.2 Parameter correction test for 2009—2015

1.2 森林生态安全预警综合评价模型

1.2.1 指标体系确立与权重计算

森林生态安全是指在一定的时空范围内,在一定外界环境和人为社会经济活动等影响下,森林生态系统能够实现自我调控和自我修复,维护自身生态系统可持续性、复杂性、恢复性、服务性的状态^[17-18]。研究基于

森林生态安全的内涵,依据数据可获性、代表性和易操作性原则,采用文献归纳法和层次分析法构建森林生态安全预警评价指标体系。采用 AHP 法和熵权法相结合进行权重赋值^[19],其优势是能把复杂系统的决策思维进行层次化,将决策过程中的定性和定量因素有机结合起来。首先采用极差标准化方法将所有指标的原始数据进行归一化处理,使所有指标无量纲化;然后分别通过熵权法和 AHP 法得到各评价指标的权重;最后利用 WAA 算子^[20]加权汇总确定各指标综合权重值 W_i 。计算公式为:

$$W_i = a W_{1i} + (1 - a) W_{2i}$$

(1)

式中, W_i 为*i*指标的综合权重; W_{1i} 和 W_{2i} 分别为采用 AHP 法和熵权法计算得出的该项指标*i*的权重值;*a*为该项指标的 WAA 算子。权重计算结果见表 1。

表 1 北京森林生态安全评价指标

Table 1 The evaluation index of forest ecological security in Beijing					
一级指标 First level index	二级指标 Second level index	指标名称(单位) Index name (Unit)	计算公式 Formula	方向 Direction	权重 Weight
北京市森林生态 安全评价(A1) FES assessment in Beijing(A1)	森林资源(B1)	C1 森林旅游开发强度(%)	森林公园面积/森林面积×100%	—	0.0530
		C2 森林采伐强度指数(%)	采伐限额/林木蓄积量×100%	—	0.0992
		C3 森林覆盖率(%)	森林面积/土地调查面积×100%	+	0.1203
		C4 单位面积森林蓄积量(m ³ /hm ²)	森林蓄积量/土地调查面积	+	0.1334
		C5 公益林比重(%)	公益林面积/森林面积×100%	+	0.0418
		C6 林业完成投资额指数(万元/hm ²)	林业完成投资额/森林面积	+	0.0523
	社会经济(B2)	C7 人类工程占用土地指数(%)	建设用地面积/土地调查面积×100%	—	0.0675
		C8 人口密度(人/hm ²)	各地区年末人口数/土地调查面积	—	0.0698
		C9 单位面积 GDP(万元/hm ²)	地区生产总值/土地调查面积	—	0.0845
		C10 产业结构指数(%)	第二产业生产总值/地区生产总值 ×100%	—	0.0488
		C11 单位森林面积人口数(人/hm ²)	地区人口数量/森林面积	—	0.0904
		C12 单位 GDP 工业污染治理完成投资额(%)	工业污染治理完成投资/地区生产总 值×100%	+	0.0390
	环境(B3)	C13CO ₂ 排放量指数(t/hm ²)	化石燃料消耗量×二氧化碳排放系 数/土地调查面积	—	0.0103
		C14SO ₂ 排放量指数(t/hm ²)	废气二氧化硫排放量/土地调查面积	—	0.0108
		C15 可吸入颗粒物年日均值(mg/ m ³)	直接获取	—	0.0153
		C16 空气质量指数(%)	空气质量二级以上天数/365×100%	+	0.0347
		C17 年降雨量(mm)	直接获取	+	0.0101
		C18 环境保护投资额指数(%)	环境保护投资额/GDP×100%	+	0.0189

1.2.2 森林生态安全警度区间确定

依据上述模型,计算出北京市 14 个区县 2009—2030 年的森林生态安全预警指数,基于 ArcMap 自然断裂点的分类情况,结合专家咨询意见,确定 0.35、0.50、0.65、0.75 为分类临界点,将生态系统安全综合指数划分为 5 个等级(表 2),分别对应 5 个预警警度区间:巨警(很不安全)、重警(较不安全)、中警(不安全)、轻警(较安全)、无警(安全)。

表 2 北京市森林生态安全预警警度划分

Table 2 The division of the forest ecological security early warning degree in Beijing					
警度区间 Warning interval	<0.35	0.35—0.50	0.5—0.65	0.65—0.75	>0.75
警级 Warning grade	I	II	III	IV	V
警度 Warning degree	巨警	重警	中警	轻警	无警

2 北京市森林生态安全预警值的时空演变特征

2.1 北京市森林生态安全预警值的时序演变特征

2.1.1 北京市整体演变特征

北京市森林生态安全预警指数整体虽呈现波动增长态势,但生态安全仍面临“中警”威胁(图3)。2009—2015年,预警指数呈略有下降态势,但幅度不大,由0.5217下降到0.5158;警度由“中警”降为“重警”,然后再上升为“中警”,并最终维持在“中警”状态。根据预警结果可知,2016—2030年,北京市森林生态安全的警度仍将保持这一趋势,维持在“中警”状态,预警指数呈上升态势,森林生态安全状况呈现改善态势,但不明显,需要采取措施加以改善和调控。

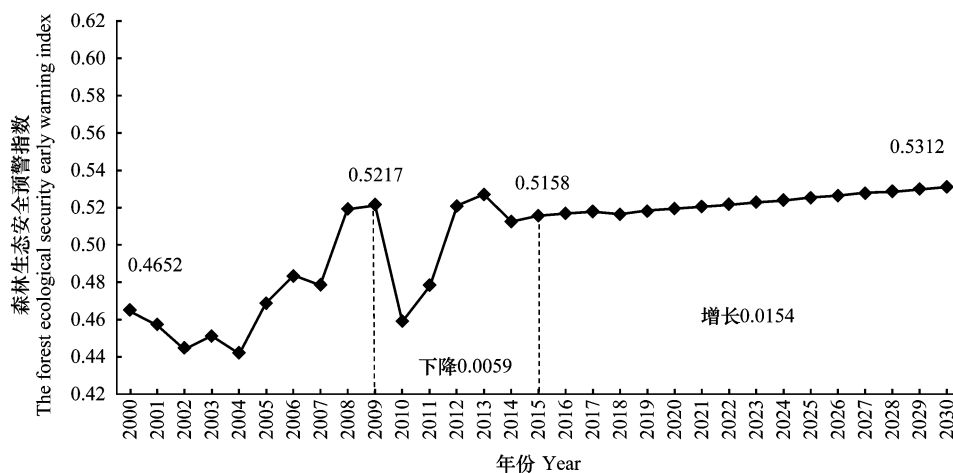


图3 北京市2000—2030年森林生态安全预警指数变化趋势

Fig.3 The change trend of early warning index of forest ecological security of Beijing in 2000—2030

2.1.2 四大功能区演变特征

2006年北京城市总体规划将北京市域划分为首都功能核心区(东城、西城),功能拓展区(朝阳、海淀、丰台、石景山),城市发展新区(昌平、顺义、房山、大兴、通州),生态涵养区(延庆、密云、怀柔、平谷、门头沟)。由于首都功能核心区森林蓄积量为零,因此只研究其他3个区域(表3)。14个区县中,延庆森林生态安全预警指数最高,3个时期均在0.7以上,预警指数最低的是石景山,在0.35以下。总体上,功能拓展区森林生态安全水平最低,3个时期平均值在0.4以下,其次是城市发展新区,预警指数均在0.5以上,生态安全水平最高的生态涵养区,预警指数稳定在0.65以上。2009—2015年,城市发展新区和生态涵养区的预警指数平均值呈现不同程度的上升,而功能拓展区的平均值则呈现下降趋势。2016—2030年,各区域的平均值均有所提升,森林生态安全状况得到改善。

2.1.3 各区县时序演变特征

研究区14个区县森林生态安全预警指数的变化可以分为3种类型:一是持续上升型:包括延庆、密云、怀柔、平谷、门头沟、昌平、顺义、房山和石景山区;二是先降后升型:包括朝阳、大兴、丰台、通州;三是持续下降型:海淀区。2009—2015年,仅海淀、朝阳、丰台、石景山和大兴区的森林生态安全预警指数有所下降,其他9个区县皆有所增加。其中,海淀区的预警指数降低幅度最大,为0.0821。2016—2030年,除海淀外,其他区县的预警指数均有所上升,森林生态安全状况有所改善,但改善幅度较小。

2.2 北京市森林生态安全预警值的空间演变特征

从空间分布特征看(图4),预警指数的等级处于Ⅱ级以下区县位于北京市功能拓展区和城市发展新区部分地区(如房山区),Ⅳ、Ⅴ级集中位于生态涵养部分地区。从分级变动看,2009—2015年,有11个区县的级别未发生变化,3个区县的级别发生了升降:其中怀柔由Ⅲ级升为Ⅳ级,延庆由Ⅳ级升为Ⅴ级,朝阳则由Ⅱ级

降为Ⅰ级,是唯一级别下降的区县。2016—2030年,朝阳由Ⅰ级升为Ⅱ级,房山由Ⅱ级升为Ⅲ级,门头沟由Ⅲ级升为Ⅳ级,其他区县级别未发生变化。

表3 北京市分区县森林生态安全预警指数及警级

Table 3 The early warning index and its warning grade of forest ecological security in sub-districts of Beijing

年份 Year		2009	警级 Warning grade	2015	警级 Warning grade	2030	警级 Warning grade
功能拓展区 Function extension zone	海淀	0.4635	Ⅱ	0.4079	Ⅱ	0.3814	Ⅱ
	朝阳	0.3714	Ⅱ	0.3377	Ⅰ	0.3849	Ⅱ
	丰台	0.3590	Ⅱ	0.3525	Ⅱ	0.4188	Ⅱ
	石景山	0.2229	Ⅰ	0.2329	Ⅰ	0.3423	Ⅰ
	平均值	0.3540	Ⅱ	0.3330	Ⅰ	0.3820	Ⅱ
城市发展新区 New urban development zone	昌平	0.5841	Ⅲ	0.5990	Ⅲ	0.6226	Ⅲ
	顺义	0.5517	Ⅲ	0.5837	Ⅲ	0.6218	Ⅲ
	大兴	0.5561	Ⅲ	0.5293	Ⅲ	0.5616	Ⅲ
	房山	0.4056	Ⅱ	0.4503	Ⅱ	0.5025	Ⅲ
	通州	0.6024	Ⅲ	0.5865	Ⅲ	0.6327	Ⅲ
生态涵养区 Ecological conservation zone	平均值	0.5400	Ⅲ	0.5500	Ⅲ	0.5880	Ⅲ
	延庆	0.7285	Ⅳ	0.7501	Ⅴ	0.8666	Ⅴ
	密云	0.6776	Ⅳ	0.7107	Ⅳ	0.7440	Ⅳ
	怀柔	0.6128	Ⅲ	0.6909	Ⅳ	0.6928	Ⅳ
	平谷	0.6739	Ⅳ	0.6940	Ⅳ	0.7235	Ⅳ
	门头沟	0.5697	Ⅲ	0.6272	Ⅲ	0.6698	Ⅳ
	平均值	0.6530	Ⅳ	0.6950	Ⅳ	0.7390	Ⅳ

3 北京市森林生态安全预警值变化的机制分析

3.1 森林自身状态是森林生态安全预警变化的内在因素

森林生态系统自身的生态承载力情况,主要通过森林生态系统自身的物质资源状况、系统结构、物种多样性、系统自身恢复性(或者抗干扰能力)和生态服务功能多样性等方面来表现,以衡量系统自我调节和自我修复的能力,能力越强则表明森林生态系统越安全。一般而言,森林资源总量是森林生态系统支撑能力的基础;森林资源质量是提升森林生态系统稳定性和安全性的关键,高质量的森林资源抗干扰能力强,能够有效抵抗外界攻击,使森林生态系统免受威胁;森林物种组成越多样,其物质的循环、能量的流动和信息的传递越复杂,生态系统多样性越高,自我恢复的能力越强,反过来为森林中的物种提供了更优越的生境,为生物进化和新物种的产生奠定了基础;森林生态系统的安全性越高,越能最大限度地发挥其物产功能、生态服务功能和森林文化功能。

就北京市而言,森林生态系统自身的生态承载力在研究期内逐渐提升。从时间差异上讲,2010—2015年北京市森林覆盖率由37.0%增加到41.60%,森林蓄积由1435.39万 m^3 增加到1701.06万 m^3 ,森林数量和质量短期内得到提升,使得预警指数由0.4591上升到0.5158。从地区差异上讲,全市森林主要分布在密云、怀柔、延庆、平谷等区县,森林面积最大的是密云县,占全市森林面积的19.12%。石景山森林面积最小,仅占全市森林面积的0.32%。山区林地面积比重大,占全市林地面积的84.2%,平原林地面积比例小,仅占全市林地面积的15.8%。这在一定程度上造成了区域森林生态安全的差异性。另一方面,实地调查发现,由于自然、社会和历史原因,北京地区森林资源结构不合理,人工纯林面积高达80%以上,中幼林比重大,树种单一;林业建设长期以来“重两头轻中间”,导致过密过疏林分多、密度适宜林分少,林分稳定性差,给病虫害防治和森林防火等带来不利影响,例如杨树害虫、美国白蛾等森林病虫害受害面积大。这些负向因素不可避免地降低了森林

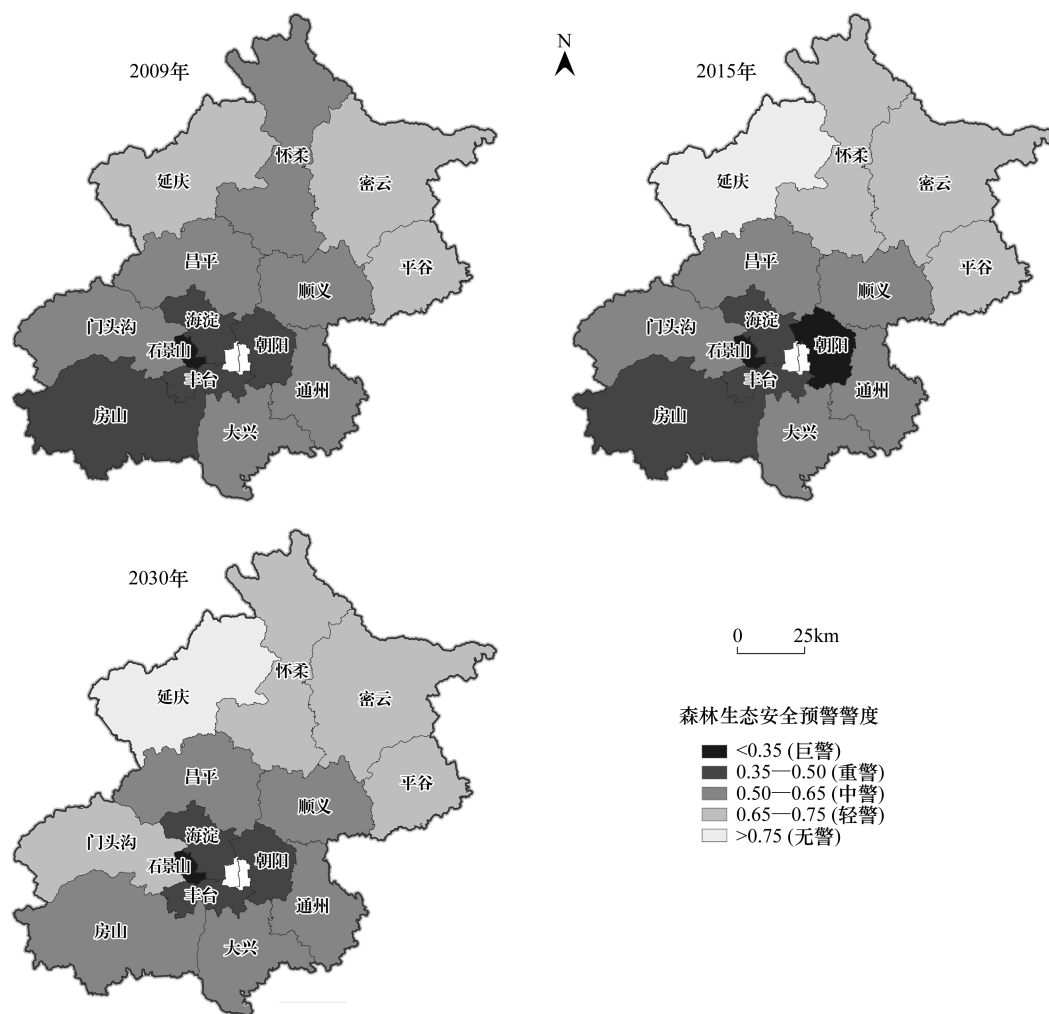


图 4 北京市森林生态安全预警指数的空间格局

Fig.4 Spatial pattern of the early warning index of forest ecological security in Beijing

资源的质量,削弱了北京市森林生态安全预警值上升的趋势。

3.2 经济发展是影响森林生态安全预警值变动的重要外力因素

在市场经济条件下,经济发展是影响北京市森林生态安全预警指数变动最主要的动力因素。社会经济发展对森林生态安全的影响主要体现:一方面,生态旅游在促进社会经济发展的同时也会对森林生态环境造成一定影响。研究表明,不合理的旅游活动如对植物的践踏、花朵枝叶的采集、外来物种的带入、用火及垃圾堆放不当等会对林地造成破坏,驱动森林生态安全预警值下降。另一方面,快速的工业化和城市化使得城市土地利用和森林景观格局发生变化,进而导致森林生态系统质量降低。其主要体现在:城市化过程中,城市森林破碎化和孤岛化现象日益严重,景观连通性降低,影响生物体迁移扩散等生态学过程;随着人口密度和交通密度的增大,汽车尾气排放及城市垃圾逐渐增多,使得森林土壤中 Cu、Ni 等重金属含量逐渐增加,影响植物生长;伴随着快速城市化进程,不透水面取代了具有生态功能的自然和半自然景观,阻碍地下水回补过程,造成植被固碳水平的降低;建成区面积快速扩张,直接挤占了周边的生态系统用地,导致森林面积和植被减少;人类活动引起湿岛、热岛、干岛效应,改变了对流层大气水分和热量状况,进而对区域森林生态安全产生影响。

就北京市整体而言,2009—2015 年,北京市 GDP 总值由 12153 亿元增长到 23041.6 亿元,年均增速为 11.25%;第二产业呈明显的上升趋势,由 2804.2 亿元增长到 4542.6 亿元,年均增速为 8.37%;与此同时,城镇人口以每年 49.43 万的速度增长。就地区差异而言,森林生态安全高集聚区主要分布在怀柔、密云、平谷和延

庆等“外围区”,而显著低聚集区主要分布在石景山、朝阳、丰台、海淀等“核心区”和房山一带。总之,经济发展所引起的森林生态旅游迅猛发展、城镇人口迅速增长及建设用地扩张速度加剧等,将不可避免地影响到自然生态环境的稳定,社会经济发展的强负反馈机制作用对北京市森林生态安全造成巨大压力。

3.3 自然环境是影响森林生态安全的第二个外力因素

自然生态环境中的大气成分是森林生长直接或间接必需的成分,影响到森林的生长量。人类对自然的利用和改造,容易对环境造成破坏和污染,推动预警值负向变动。具体表现为:随着人口的不断增加及社会经济活动的发展必然会导致大气环境的变化,严重时会引起污染。大气污染物的来源主要包括:由含碳燃料的不完全燃烧、排放的尾气废气、内燃机厂和电厂的污染物排放而产生的 O_3 、氮氧化物、 SO_2 和颗粒状污染物等。例如:当 SO_2 浓度在阈值之上时,植物生长发育受阻,叶片将枯焦脱落,直到枯萎死亡; O_3 则主要伤害植物细胞膜,导致植株出现减产;颗粒状污染物则能擦伤叶面,阻碍阳光,妨碍光合作用,影响植物正常生长等。

北京市统计数据显示,从时间上来看,2009—2015 年, NO_2 、 SO_2 以及可吸入颗粒物年日均值总体呈下降趋势, NO_2 和 SO_2 的年日均值由 2009 年的 0.053 mg/m^3 和 0.034 mg/m^3 分别减少到 2015 年的 0.050 mg/m^3 和 0.014 mg/m^3 ;可吸入颗粒物年日均值从 2009 年的 0.121 mg/m^3 下降至 2015 年的 0.102 mg/m^3 。大气 O_3 问题日益严重,近 3 年北京大气 O_3 浓度水平高、增长速度快,尤其是 2015 年,北京 O_3 超标天数较 2014 年上升 17%。年降雨量呈现下降趋势,由 2009 年的 480.6 mm 下降到 2015 年的 458.5 mm。从空间上来看,北京地区西部、北部和东北部的污染物浓度明显低于西南部、南部和东南部;从西北部山区到东南部平原,大气污染程度一般呈递增的趋势。许多研究表明,森林对大气污染的净化具有一定限度,当超过其限度—阈值后,大气污染就会对森林产生危害,使得森林的净化能力减弱,进而可能导致森林物种的丧失或灭绝。

3.4 林业政策是驱动森林生态安全演化的第三个外力因素

林业政策的有效实施是森林生态安全稳步提升的正向驱动力。具体来看:自 2000 年以来,北京市林业进入发展新阶段,由粗放发展走向治理大于破坏、人与自然和谐相处,林业发展战略确定为以生态建设为主。“三北”防护林工程第二阶段四期工程自 2001 年启动,涉及大兴、通州、顺义、朝阳 4 个区,到 2010 年全面完成营造林 6.43 万 hm^2 。2002 年市政府在全国率先实施中幼林抚育工程,截止 2005 年完成了 20.00 万 hm^2 中幼林抚育任务,有效地调整了林分结构,促进了林木生长^[21],改善了山区生态景观。2007 年,北京市园林绿化局大力推进大地景观建设,截至 2010 年营造彩叶林 6700 hm^2 ,使全市彩叶林面积达到 2.13 万公顷。2008 年,首钢的搬迁在一定程度上缓解了废气排放问题,为首都森林生态安全的发展带来重大机遇。受上述原因,森林生态安全在 2000—2009 年得到明显改善。但受奥运后机动车激增以及快速城镇化的综合影响,2009—2010 年森林生态安全急剧恶化。从 2010 年起,北京市通过加大生态补偿和森林健康经营管理资金投入,鼓励、支持山区农民参与生态公益林保护、建设和经营管理,以有效推动实现“养山增效、兴林富民、科学经营、协调发展”的目标,截至 2010 年末,全市森林资产总价值达到 6148 亿元,生态服务总价值达到 5539 亿元,年固定二氧化碳 992 万 t,释放氧气 724 万 t,森林生态服务功能有显著提升。2012 年,市委开始实施平原百万亩造林工程的重大决策,大幅增加林业投资额,单位投资额高达 $2.49\times 10^4\text{ 元/hm}^2$ 。截至 2015 年,北京市完成人工造林 1.69 万 hm^2 ,封山育林 8.33 万 hm^2 ,平原地区森林覆盖率提高到 25.6%,山区森林覆盖率提高到 56.65%,显著提升了城市生态承载能力,完善了首都生态空间布局。受此影响,2010—2015 期间北京市森林生态安全恶化态势出现明显扭转并逐年上升,预警指数上涨了 12.33%,森林生态安全呈现改善状态。2015 年,市政府制定了《北京市国有林场改革实施方案》,并配合市有关部门建立国家公园体制试点工作,逐步开展国有林场的改革建设,为森林生态安全系统的进一步完善开启了新篇章。

4 结论与建议

4.1 主要结论

(1) 2009—2030 年,北京市森林生态安全整体呈改善趋势,预警指数从 2009 年 0.522 增加到 2030 年的

0.53。从区域角度来看,生态涵养区的森林生态安全状况明显优于其他地区,发展新区的森林生态安全改善显著,功能拓展区个别地区则有退化迹象。

(2)森林生态安全预警结果随时间的变动存在地区差异。2009—2015年,除朝阳、海淀、丰台、大兴和通州区的森林生态安全预警指数下降外,其他区县均呈上升趋势,其中以海淀下降幅度最大。比较而言,2016—2030年,除海淀外,其他区县预警指数小幅上升;石景山区仍为巨警,海淀和朝阳区为重警,森林生态安全状况仍处于较差水平,应是今后关注重点。因而,未来在提高当地森林生态安全水平时,应因地制宜,根据不同情况采取相应的措施。

(3)预警结果也存在空间分布差异。森林生态安全预警指数较好区域主要在怀柔、密云、平谷和延庆等县域聚集;处于中等区域的门头沟、昌平和顺义等地森林生态安全状况逐步上升;预警指数显著低聚集区,主要分布在北京市中心的石景山、朝阳、丰台、海淀和房山。森林生态安全预警指数从城市功能拓展区到城市发展新区及生态涵养区,呈现出由低而高的变化趋势,其低值区随着城市化进程的加快而逐渐扩大。

(4)根据当前森林生态安全现状及未来预警情况,北京市部分区县森林生态安全发展态势未得到显著改善。森林生态安全的形成和演变主要是森林资源、社会经济、自然环境和林业政策相互叠加的结果,其演变特征和驱动机制,仍有待今后结合典型案例进行深入研究。

4.2 几点建议

(1)总体看,各区县应调整和优化林分树种结构、龄组结构,优先营造混交林,加强低产林改造,加强林业有害生物防控,全面保护森林资源生态安全。此外,要加大林业投资力度,优化投资结构,确保森林质量投资比例,建立健全林业财务管理制度和会计核算制度,对林业投入资金实行全程监督控制,提高首都森林生态安全。

(2)对于经济增长较快、森林资源相对缺乏的朝阳、海淀和石景山等区县,应严格落实生态红线管理机制,以资源环境承载力为硬约束,减小人类活动对森林生态系统施加的压力。加大森林可持续经营培育,提高混交林比重,增强森林生态系统自身的承载力。

(3)对于森林资源较丰富、经济相对落后的山区,应继续强化山区重要生态源地和生态屏障功能,坚持把增强生态服务功能放在第一位,培育和抚育中幼林、保护现有天然林资源,人工促进天然更新和森林演替,提升森林资源的质量,进一步扩大生态环境容量;大力发展绿色经济,实现产业的生态链接,走经济与生态并重、绿色可持续之路。

(4)对于大气污染程度较高的西南部、南部和东南部,应该适当控制人口、机动车的增长及污水的排放,加强废气管理,减少环境压力,改善生态环境质量。

需要指出,本研究主要基于分区县的人口和社会经济统计数据,统计数据固有的不确定性会对森林生态安全预警指数测度的准确性产生影响;已有研究大多从区域整体视角研究生态安全预警,本文从区县尺度研究了北京市森林生态安全预警指数的空间差异,可为首都制定差异化和有针对性的对策措施提供支撑,下一步应从林场、小班和景观等微观尺度开展更精细化的研究。

参考文献(References):

- [1] 舒帮荣,刘友兆,徐进亮,何蓓蓓,吴冠岑.基于BP-ANN的生态安全预警研究——以苏州市为例.长江流域资源与环境,2010,19(2): 1080-1085.
- [2] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,薛雄志.生态安全研究进展.生态学报,2005,25(4): 861-868.
- [3] Xi W D, Sun Y H, Tian X N, Wang H Y, Jin Q F. Research on the safety risk structure and early warning system of agriculture with illustrations of production of live pigs to farmers. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2010, 1: 462-468.
- [4] Mitra C, Kurths J, Donner R V. An integrative quantifier of multistability in complex systems based on ecological resilience. Scientific Reports, 2015, 5: 16196.
- [5] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals For Environmental Management. Washington, DC: Island Press, 1992: 234-246.

- [6] Pirages D. Ecological security: Micro-threats to human well-being//Baudot B S, Moomaw W R. People and Their Planet: Searching for Balance. New York: St. Martin's Press, 1999: 284-298.
- [7] 王俭, 李雪亮, 李法云, 包红旭. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2233-2240.
- [8] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [9] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [10] 王耕, 刘秋波, 丁晓静. 基于系统动力学的辽宁省生态安全预警研究. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 144-149.
- [11] 肖建红, 于庆东, 刘康, 陈东景, 陈娟, 肖江南. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估——以舟山群岛为例. 地理学报, 2011, 66(6): 842-852.
- [12] 郭小鸿. 自然保护区生态安全评价指标体系探讨——以医巫闾山自然保护区为例. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(3): 24-27.
- [13] 周彬, 虞虎, 钟林生, 陈田. 普陀山岛旅游生态安全发展趋势预测. 生态学报, 2016, 36(23): 7792-7803.
- [14] 鲁莎莎, 陈妮, 关兴良, 陈鹤筱. 基于 GIS 和能值分析的黑龙江省农业生态经济格局综合评价. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 879-886.
- [15] 李秀霞, 周也, 张婷婷. 基于 BP 神经网络的土地生态安全预警研究——以吉林省为例. 林业经济, 2017, 39(3): 83-86.
- [16] 毛旭鹏, 陈彩虹, 郭霞, 周丹华, 胡焕香. 基于 PSR 模型的长株潭地区森林生态安全动态评价. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 82-86.
- [17] 鲁莎莎, 郭丽婷, 陈英红, 陈妮, 张珉珊, 关兴良. 北京市森林生态安全情景模拟与优化调控研究. 干旱区地理, 2017, 40(4): 787-794.
- [18] 王金龙, 杨伶, 李亚云, 张大红. 中国县域森林生态安全指数——基于 5 省 15 个试点县的经验数据. 生态学报, 2016, 36(20): 6636-6645.
- [19] 汤旭, 冯彦, 鲁莎莎, 张大红. 基于生态区位系数的湖北省森林生态安全评价及重心演变分析. 生态学报, 2018, 38(3): 886-899.
- [20] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用. 北京: 清华大学出版社, 2004: 8-12.
- [21] 王金龙, 杨伶, 张大红, 邵权熙. 京冀合作造林工程效益立方体评估模型. 林业科学, 2016, 52(10): 125-133.