

1980—2020 年松嫩平原生态脆弱性时空分异

宋春威^{1,2}, 相恒星³, 陈美宏^{1,2}, 社会石^{1,2}

(1.吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000; 2.吉林省生态环境遥感
大数据重点实验室, 吉林 四平 136000; 3.中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: [目的] 探究 1980—2020 年松嫩平原生态脆弱性时空变化特征和驱动机制, 为该区生态系统管理与可持续发展提供科学依据。[方法] 从自然和人文两个角度出发, 采用“压力—状态—响应”(PSR)模型构建评价指标体系, 结合主成分分析法和 Moran'*I* 指数开展研究。[结果] ①松嫩平原生态脆弱性以极度、重度和中度脆弱性为主, 共占 81.72%。2000 年之前生态脆弱性整体水平呈现上升趋势, 2000 年之后生态脆弱性整体水平不断下降。②松嫩平原生态脆弱性以轻度和中度脆弱性变化为主, 变幅分别为 62.19% 和 91.30%。③生态脆弱性变化是由于草地、水域、未利用地、建筑用地和耕地间的转化。④生态脆弱性存在空间自相关性, 低—低集聚主要分布在研究区西部林地区域。[结论] 近 40 a 松嫩平原生态脆弱性总体呈现波动降低趋势, 空间上生态脆弱性自东向西逐渐增加, 气温、降水等自然因素和土地利用等人文因素对生态脆弱性影响较大。

关键词: 生态脆弱性; 空间自相关; 空间主成分分析; 生态环境; 松嫩平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0366-09

中图分类号: X826, X22

文献参数: 宋春威, 相恒星, 陈美宏, 等. 1980—2020 年松嫩平原生态脆弱性时空分异[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 366-374. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.042; Song Chunwei, Xiang Hengxing, Chen Meihong, et al. Spatiotemporal variability in ecological vulnerability of Songnen Plain from 1980 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 366-374.

Spatiotemporal Variability in Ecological Vulnerability of Songnen Plain from 1980 to 2020

Song Chunwei^{1,2}, Xiang Hengxing³, Chen Meihong^{1,2}, Du Huishi^{1,2}

(1.College of Tourism and Geographical Science, Jilin Normal University,

Siping, Jilin 136000, China; 2.Key Laboratory of Remote Sensing of Ecological

Environment in Jilin Province, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China; 3.Northeast

Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract: [Objective] The characteristics and driving mechanisms of spatial and temporal changes in the ecological vulnerability of the Songnen Plain from 1980 to 2020 were studied in order to provide a scientific basis for ecosystem management and sustainable development in the region. [Methods] From the perspective of natural factors and human factors, the “pressure-state-response” (PSR) model was used to build an evaluation index system. Principal component analysis was combined with the Moran'*I* index. [Results] ① The ecological vulnerability of the Songnen Plain was dominated by extreme, severe, and moderate vulnerabilities, accounting for 81.72% of the total vulnerability. The overall level of ecological vulnerability showed an upward trend before 2000, and the overall level of ecological vulnerability declined after 2000. ② The ecological vulnerability of the Songnen Plain was dominated by light (62.19%) and moderate (91.30%) vulnerability changes. ③ Changes in ecological vulnerability were due to conversions between grasslands, waters, unused land, construction land, and cultivated land. ④ Spatial autocorrelation existed in ecological vulnerability, and low-low aggregation was mainly located in the forestland area in the western

收稿日期: 2022-10-08

修回日期: 2022-12-26

资助项目: 吉林省自然科学基金项目“松嫩沙地灌丛沙丘发育的地貌—生态过程”(20210101398JC)

第一作者: 宋春威(1998—), 男(满族), 吉林省伊通县人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。Email: schw1817@163.com。

通讯作者: 社会石(1983—), 男(汉族), 吉林省伊通县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区地貌方面的研究。Email: duhs@jlnu.edu.cn。

part of the study area. [Conclusion] The ecological vulnerability of Songnen Plain during the past 40 years generally showed a fluctuating and decreasing trend. The spatial ecological vulnerability gradually increased from east to west. Natural factors such as temperature and precipitation, and human factors such as land use had a great impact on ecological vulnerability.

Keywords: ecological vulnerability; spatial autocorrelation; spatial principal component analysis; ecological environment; Songnen Plain

生态脆弱性理论起源于 20 世纪提出的生态过渡带理论,是生态系统自身固有的属性,是指在特定的时空尺度上,由于外界环境变化生态系统所表现出的抗干扰能力以及自我恢复的能力^[1]。近几十年来,随着全球环境变化和人类活动加剧,生态系统的自我调节能力逐渐减弱破坏了原本平衡的生态系统,导致生态脆弱性问题日益凸显,因此生态脆弱性评估工作成为全球研究的热点^[2]。生态脆弱性能够在一定程度上掌握生态系统变化的原因和特点,可为生态可持续发展和生态保护提供很大程度的借鉴作用和科学依据,并为生态恢复工程提供决策支持^[3]。国内外学者针对生态脆弱性从不同区域和不同尺度开展相关的工作,运用不同的评价模型和方法,取得了大量研究成果^[4-5]。Ippolito 等^[6]运用脆弱性指数方法,对意大利北部的两个河流系统在面对多种压力源时的生态脆弱性进行评估,揭示生态系统对多种压力源的潜在响应。张金茜等^[7]选取 8 个定量指标构建生态脆弱性评价体系,基于 SRP 模型结合景观格局指数和生态系统服务类型,从 3 种不同的尺度对 2002 和 2014 年甘肃白龙江流域的生态脆弱性的空间关系进行深入分析。上述学者从评价方法和驱动因素等多方面开展研究,加深了对区域的生态脆弱性现状以及分布特征的理解。但也存在一些局限性,在构建指标体系时,忽略各指标间的相关性,将选取的指标全部加入评价模型中,影响最终评价的精度。压力—状态—响应”模型(PSR)在人地关系及可持续发展中应用广泛,从自然环境本身和人文干扰两个角度出发,反映人类干扰改变了自然环境本身状态,进而通过决策等改善生态环境,从而促进生态系统的良性循环^[8]。因此,亟需采用 PSR 模型,掌握研究区生态脆弱性变化趋势,分析空间异质性特征,对区域生态脆弱性状况进行综合评估。此外,当前的研究多集中于干旱区^[9]、高寒区^[10]、煤炭矿区等^[11]自然条件较差或人为干扰剧烈的区域,但是对松嫩平原这类典型黑土农业区的生态脆弱性研究较少。松嫩平原是松花江和嫩江冲击形成的平原,是中国重要的粮食生产基地,对于国家及区域粮食安全和生态安全至关重要。

松嫩平原生态环境十分脆弱,它是世界三大盐碱土分布区之一,且盐碱程度不断加剧造成农田减产、草地退化、湿地锐减,生态环境日趋恶化影响松嫩平原地区社会经济的发展^[12]。近年来,为满足当地社会发展的需求和国家粮食生产要求,松嫩平原受到不合理的生产方式影响,该区的土地利用变化显著,使得该区域黑土层退化严重,生态脆弱性表现出较强的典型性和复杂性,受到社会各界的广泛关注。基于此,本文以松嫩平原作为研究区,基于 PSR 模型选取 1980—2020 年气温、降水、坡度等 13 个指标因子构建评价指标体系,运用空间主成分分析法和空间自相关法对松嫩平原生态脆弱性进行评价,综合分析松嫩平原的生态脆弱性时空演化格局、空间异质性特征以及驱动机制,旨在为松嫩平原的生态安全、生态环境保护和修复提供理论依据。

1 研究区概况

松嫩平原(42°49′—49°13′N, 121°38′—128°19′E)与大兴安岭和小兴安岭接壤,位于吉林省西部和黑龙江省西南部,总面积约为 $2.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。研究区共包括 9 个市级行政区,分别是吉林省的长春市、四平市、松原市和白城市以及黑龙江省的哈尔滨市、大庆市、绥化市、黑河市和齐齐哈尔市^[13-14]。该区域属于温带大陆性半湿润半干旱季风气候,四季分明,降水主要集中在夏季,年均降水量为 350~650 mm,年均气温为 -2~7 °C,年均蒸发量为 1 200~1 600 mm。研究区地势平缓,土壤以黑土和黑钙土为主^[15]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究选取 1980, 1990, 2000, 2010 和 2020 年 5 个时期的数据(表 1)。不同的数据来源和精度导致选取的评价指标存在空间差异,为方便后续计算,本研究对数据进行初步整理并以栅格作为基本评价单元,将分辨率不同的所有数据重新采样为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,并将空间数据设置为 Krasovsky 坐标 Albers 投影,保证各指标具有良好的空间重合性^[16]。

表 1 生态脆弱性评价指标来源及处理

Table 1 Source and processing of evaluating indicators for ecological vulnerability

指标	计算方法及说明	分辨率/比例尺	数据来源
地形起伏度	数字高程模型提取	90 m	地理空间数据云平台
河网密度	数字高程模型提取	90 m	地理空间数据云平台
年平均降水量	克里金插值法	500 m	中国气象数据网
年均温度	克里金插值法	500 m	中国气象数据网
植被覆盖度	像元二分模型	500 m	美国航天局网站
植被净初级生产力	CASA 模型	500 m	美国航天局网站
土地利用类型	重分类为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地 6 类	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤类型分布	土壤数据库	1:100 万	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤侵蚀强度	土壤类型矢量数据	1:100 万	中国科学院资源环境科学数据中心
人口密度	人口数量/土地面积	—	中国统计年鉴
人均 GDP	GDP/人口数量	—	中国统计年鉴
人均耕地面积	耕地面积/人口数量	—	中国统计年鉴
人均林地面积	林地面积/人口数量	—	中国统计年鉴

2.2 生态脆弱性指标体系构建

PSR 模型即压力—状态—响应模型,通过人类和自然环境间相互作用相互影响,分析生态环境内部因果关系^[17-18]。压力指标反映人类活动对环境所造成的影响,本文通过选取人口密度和土地利用类型来反映社会活动对松嫩平原环境带来的压力。状态指标是指生态系统内部各种生态因子长期作用的结果^[19]。本文通过选取平均降水量和平均温度反映气候脆弱因子,地形起伏度和河网密度反映地貌脆弱因子,土壤侵蚀强度数据反映水土流失状况,土壤类型分布数据反映松嫩平原土壤脆弱性因子,植被覆盖度和植被净初级生产力反映植被生长状况和松嫩平原生态系统的质量。响应指标是指人类为了提高生态环境质量,采取一系列措施减缓或阻止给生态环境带来的负面影响。本文通过选取人均 GDP 值、人均耕地面积和人均林地面积来反映生态脆弱性评价的响应因子。

2.3 指标数据标准化

在生态脆弱性评价过程中,由于选取的各评价指标的性质和固有属性不同,所以无法对生态系统脆弱性直接评价^[20]。因此,本研究对不同评价指标数据统一进行标准化处理,通过选取的不同评价指标对松嫩平原生态环境的影响,将各指标划分为正向指标和负向指标两类^[21]。计算公式为:

$$R_T = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$R_G = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: R_T 为正向指标标准化值; R_G 为负向指标标准化值; X_{\max} , X_{\min} 分别为指标 X 的最大值和最小值。

研究选取的 13 个指标通过公式得到正向指标 8 个和负向指标 5 个。正向指标包括:人口密度、地形起伏度、土地利用类型、土壤侵蚀强度、土壤类型分布、人均 GDP 值、人均耕地面积、人均林地面积。负向指标包括:植被净初级生产力、植被覆盖度、河网密度、平均温度、平均降水量。

2.4 生态脆弱性指数

空间主成分分析 (SPCA) 是基于数理统计手段,旋转原始特征光谱空间的坐标轴,将相关的多个空间指标数据转换为互不关联的几个综合性指标数据,达到减少数据冗余的目的^[22]。通过 SPCA 法计算 PSR 模型选取的各指标权重,可在一定程度上减少人为赋予指标权重,同时对松嫩平原 1980,1990,2000,2010 和 2020 年 5 a 生态脆弱性进行主成分分析,根据主成分大于 85% 的前 5 个主成分,计算松嫩平原生态脆弱性指数,计算公式为^[23]:

$$A_n = R_1 C_{1n} + R_2 C_{2n} + \dots + R_n C_{kn} \quad (3)$$

式中: A_n 是生态脆弱性指数; $R_1, R_2 \dots R_n$ 是对应指标权重; $C_{1n}, C_{2n} \dots C_{kn}$ 表示累计贡献率大于 85% 的主成分; n 为年份。生态脆弱性指数越小,表明研究区生态环境越好;反之,越差。

为了便于比较 1980,1990,2000,2010 和 2020 年 5 期数据的生态脆弱性,本文将 5 期数据的结果进行标准化处理,计算公式为^[24]:

$$S_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \times 10 \quad (4)$$

式中: S_E 为生态脆弱性指数标准化值; E 为研究区生态脆弱性指数; E_{\max} , E_{\min} 分别为研究区范围内生态脆弱性指数的最大值和最小值。

参考松嫩平原生态环境特征及北方生态区生态

脆弱性直方图分布和标准差,综合考虑松嫩平原特殊的生态环境特征,基于自然断点法对松嫩平原生态脆弱性指数进行分级,将生态脆弱性进行分级划分为 5 级(表 2)。

表 2 生态脆弱性分级标准

Table 2 Classification standards for ecological vulnerability

脆弱性等级	脆弱性指数	生态特征
微度脆弱性	[0,1.8]	生态环境状况好,具有很强的抵抗外界干扰能力
轻度脆弱性	(1.8,3.1]	生态环境状况良好,具有较强的抵抗外界干扰能力
中度脆弱性	(3.1,5.7]	生态环境状况一般,具有一般的抵抗外界干扰能力
重度脆弱性	(5.7,7.5]	生态环境状况较差,具有较差的抵抗外界干扰能力
极度脆弱性	(7.5,10]	生态环境状况差,具有很差的抵抗外界干扰能力

2.5 空间自相关分析

空间自相关分析是一系列空间数据分析方法和技术的集合,是监测空间属性及其变化的相关性程度的重要方法^[25]。本研究针对单一要素选取局部 Moran'*I* 指数来表达空间集散结构及分布规律。空间关联局部指标聚类图(LISA)是在局部 Moran'*I* 指数基础上计算同类对象的相似度和不同对象间的差异的结果,主要包含 5 种集聚模式:高一高集聚、高一低离散、低一高离散、低一低集聚和不显著^[26]。局部 Moran'*I* 指数的计算公式为:

$$I = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_j W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (5)$$

式中:*I* 为 Moran'*I* 指数; X_i, X_j 分别为第 *i* 个、第 *j* 个评价单元内的脆弱性指数的均值; \bar{X} 为全部评价单元的脆弱性均值; W_{ij} 为空间权重矩阵; *S* 为空间权重矩阵各元素之和。

3 结果与分析

3.1 松嫩平原生态脆弱性空间分异

从空间上来看,1980—2020 年松嫩平原生态脆弱性总体呈现自西向东呈现逐渐递减的趋势(图 1)。这可能与松嫩平原所处的地理位置和自然环境的本底条件息息相关。研究区自西向东呈现多年蒸散量逐渐增加的趋势,土壤类型也由研究区西部盐碱土向研究区中部黑钙土和研究区东部黑土过渡,植被类型也呈现从草原向林地依次过渡。2000 年松嫩平原的极度和重度脆弱性占研究区总面积的 68.31%,而中度脆弱性研究区面积的 15.14%。1980 年,松嫩平原生态环境脆弱性等级的面积大小由高到低依次为:中度脆弱性>轻度脆弱性>极度脆弱性>重度脆弱性>微度脆弱性,其对应面积比例分别为:26.45%>21.69%>20.04%>19.49%>12.23%。而到 2020 年,松嫩平原生态环境脆弱性等级的面积大小由高到低依次为:中度脆弱性>重度脆弱性>极度脆

弱性>微度脆弱性>轻度脆弱性,其对应面积比例分别为:50.60%>16.94%>14.18%>10.08%>8.20%。研究区西部地区以极度脆弱性为主,包括白城市、大庆市等地区,其主要原因是该区土壤主要是由风沙土组成,持水能力较差,土壤水分极易流失。由于松嫩平原的研究区西部地处内陆,离海洋较远,具有很强的大陆气候,年均降水量少蒸散量大,加剧了研究区西部的土壤缺水程度。轻度和微度脆弱性主要分布在研究区东部地区,包括四平市和长春市东部、哈尔滨市东部、黑河市以及绥化市东部,这主要是因为该区与研究区西部相比,气候较为湿润,植被覆盖度较高,所以土壤涵养水源的能力较强。重度和中度脆弱性分布在研究区中部地区,包括松原市、齐齐哈尔市、绥化市中西部以及哈尔滨市中西部,主要是因为该区处于研究区东部和研究区西部的过渡区域,土壤处于中度缺水状态。松嫩平原是典型的农业区,面积广阔,地势平坦,研究区自西向东降水量逐渐增加,土壤水分含量也与降水量相关。

3.2 松嫩平原生态脆弱性时间序列变化特征

1980—2020 年,松嫩平原中度脆弱性面积呈波动增加趋势,变化幅度为 91.30%。而微度、轻度、重度和极度脆弱性面积均呈现波动减少的趋势,变化幅度分别为 17.58%,62.19%,13.53%和 29.24%(图 2)。以 2000 年为分割点,1980—2000 年,松嫩平原地区微度、轻度和中度脆弱性面积呈降低趋势,总体上分别下降 60.83%,37.48%和 42.76%,而重度和极度脆弱性面积呈上升趋势,总体上分别升高 37.79%和 75.55%。齐齐哈尔市、大庆市、绥化市、松原市、长春市、四平市、黑河市南部和哈尔滨市中西部由原来的微度、轻度、中度和重度脆弱性转化为轻度、中度、重度和极度脆弱性。这是因为中国社会经济高速发展,人类对生态系统的干扰作用增强,如农业生产为主的区域,主要是对森林和草原植被区的开垦,导致土壤的有机质含量和土地利用类型的变化,从而引起生态

环境和生态脆弱性的变化。2000—2020 年,松嫩平原极度脆弱性、重度脆弱性面积呈下降趋势,降幅分别为 59.69% 和 45.93%,而中度脆弱性、轻度脆弱性和微度脆弱性面积呈上升趋势,增幅分别为 234.21%、39.53% 和 52.48%。其中,齐齐哈尔市、绥

化市、松原市、大庆市、黑河市,以及四平市和哈尔滨市西部极度脆弱性和重度脆弱性大幅降低为中度脆弱性,这是因为针对区域的生态问题开展了退耕还林还草政策的实施,使原本被破坏环境得到了弥补,从而降低了生态系统的脆弱性。

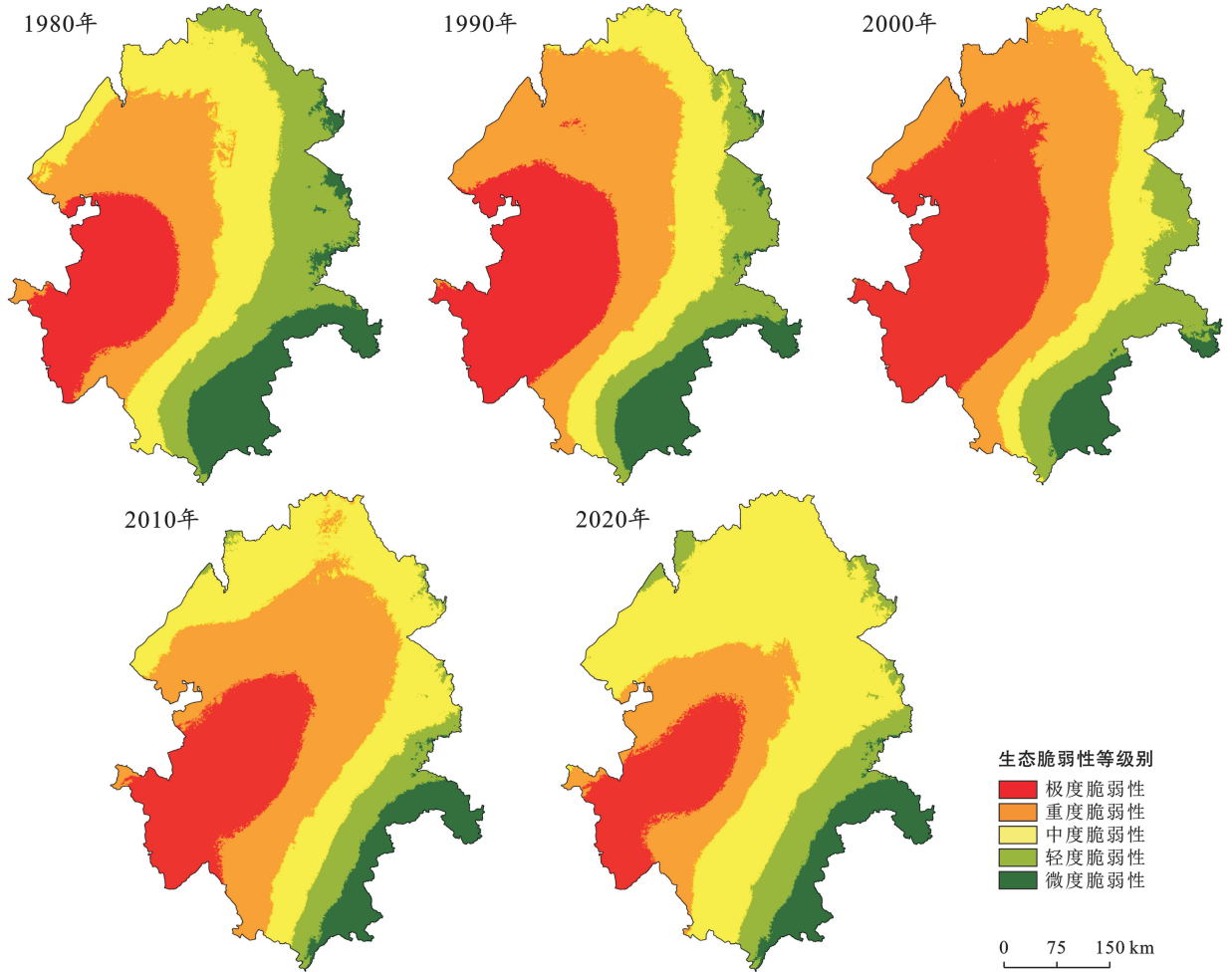


图 1 松嫩平原生态脆弱性空间分布

Fig.1 Spatial distribution of ecological vulnerability in Songnen Plain

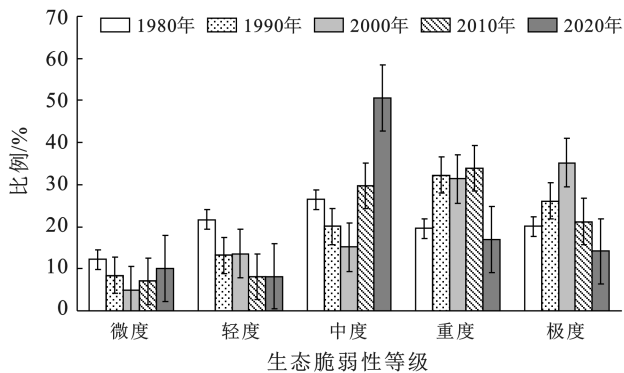


图 2 松嫩平原生态脆弱性不同等级时间变化特征

Fig.2 Time change characteristics of different levels of ecological vulnerability in Songnen Plain

3.3 松嫩平原不同土地利用结构的生态脆弱性时空变异

不同的土地利用类型间相互转换致使研究区生态脆弱性发生不同程度的变化。2020 年,依照不同的土地利用面积由低到高的依次为:建筑用地<水域<草地<未利用地<林地<农田(图 3—4)。从总体上分析,1980—2020 年建筑用地面积呈现增加的趋势,增幅 195.56%。1980—2020 年水域面积呈减小的趋势,降幅为 37.81%。1980—2020 年松嫩平原的林地和草地面积呈现先下降后上升的趋势,2000 年都达最小值,林地和草地面积分别占研究区总面积的 16.68% 和 4.90%。1980—2020 年,松嫩平原耕地面

积呈现先上升后下降的趋势,2000 年时耕地面积达到最大值占研究区面积的 64.99%。以 2000 年作为分割点,1980—2000 年林地和草地面积分别减少 6 092.80 和 7 056.00 km²,降幅分别为 14.02% 和 39.13%,而耕地面积增加 19 219.20 km²,增幅 15.21%。2000—2020 年,由于退耕还林还草政策的实施,耕地面积减少 7 347.20 km²,降幅为 5.05%,林地和草地面积分别增加 5 286.40 和 2 867.20 km²,增幅分别为 14.15% 和 26.12%,主要原因是人类不断的开垦,导致林地草地转化耕地。研究区东部生态区微

度脆弱性、轻度脆弱性和中度脆弱性主要分布在林地、水域和耕地,这主要是因为该区的生态本底条件较好,所处地带区域气候湿润,土壤条件较好,气候因子与土壤因子的空间差异性不大。研究区西部以极度脆弱区为主,大部分集中在未利用地和草地,其原因在于该生态区的生态系统状况受自然因素的气温、降水等因素影响较大,降水稀少蒸发量大,植被覆盖量和物种多样性较低,生态系统较单一。人类活动导致土壤盐渍化和沙漠化,使本就恶劣的生态环境变得更加脆弱,进而改变了该区生态脆弱性。

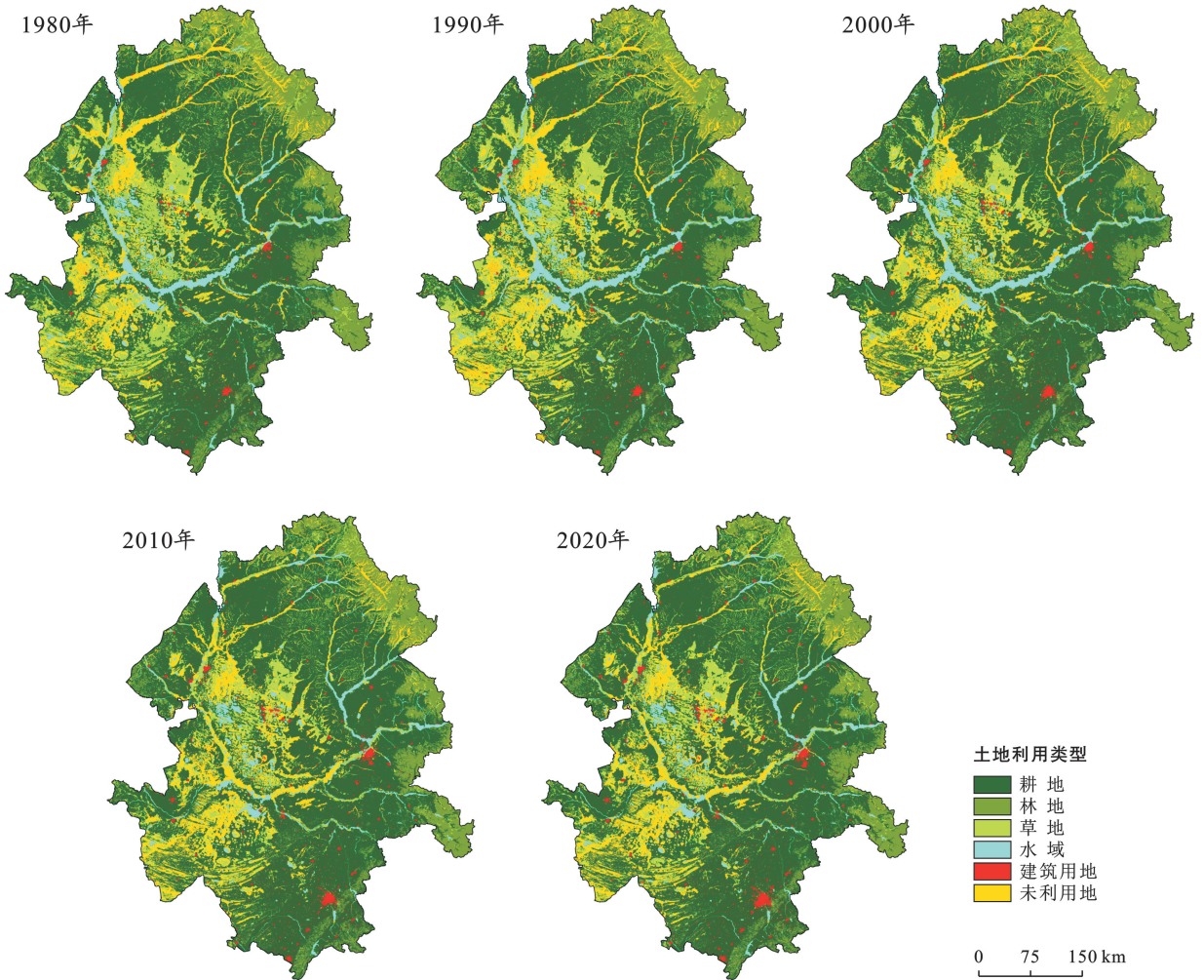


图 3 松嫩平原土地利用动态监测结果

Fig.3 Dynamic monitoring results of land use in Songnen Plain

3.4 松嫩平原生态脆弱性空间集聚特征

本研究以栅格为空间研究单元,通过 Moran's 指数分析 1980—2020 年中国松嫩平原生态脆弱性指数的空间相关性,生成集聚图(图 5)。生态脆弱性在空间上呈现正相关关系且相关关系较强,表明研究区生态脆弱性呈现出空间集聚性特征,且整体趋势大致

相同。近年来,水土开发利用增强及城市化建设的加快,人工建设也进入大规模生态外部性的空间发展阶段,空间集聚性特征也存在不同程度上向外的扩张和迁移。

低—低集聚特征主要位于研究区东部,土地利用类型以林地为主,该区以微度、轻度和中度脆弱性为

主,1980—2020 年低—低集聚区空间基本相似,但不同年份也存在集聚性的扩张和迁移。高一高集聚特征主要位于研究区西部,土地利用类型以未利用地和草地为主,该区以极度和重度脆弱性为主。1980—2020 年,以 2000 年为分割点,高一高集聚特征呈现先增加后下降的趋势,由于人类活动的影响和土地利用类型的变化,高一高集聚特征也发生了不同程度的迁移,如大庆市发生的变化特征较大,主要是因为石油的开采,导致该地区人口密度,城镇化和经济发展较快,说明人类活动的集聚程度与脆弱性的空间集聚程度也具有—致性。

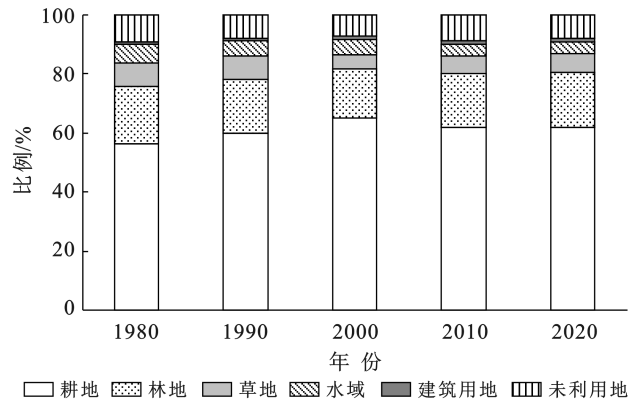


图 4 松嫩平原不同年份土地利用面积比例

Fig.4 Land use area ratio in different years in Songnen Plain

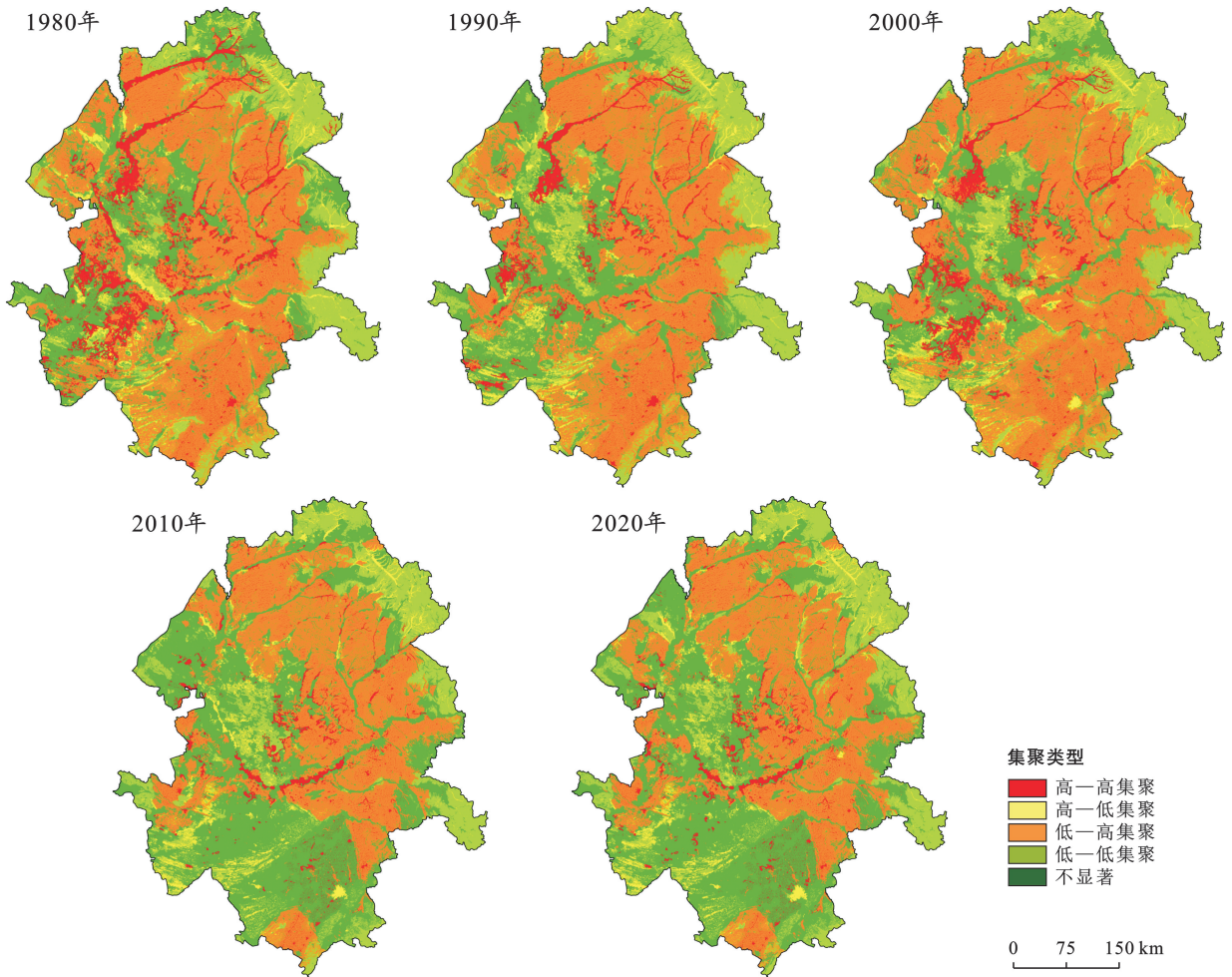


图 5 松嫩平原局部空间自相关 LISA 集聚图

Fig.5 Local space self-related LISA cluster diagram of Songnen Plain

4 讨论

4.1 生态脆弱性自然因子驱动力分析

松嫩平原作为典型的脆弱区,受多种自然因子和人文因子的综合作用的结果^[27]。自然因子是影响区域生态脆弱性的成因之一,在一定程度上决定了空间

分布格局^[28]。本研究发现,生态脆弱性空间格局分布主要与地形因子、气象因子和土壤因子相关,该结论与前人的研究结论一致,如郭兵等^[29]利用综合指数法对中国北方半干旱荒漠草原的生态脆弱性进行分析后得出地形、气温、降水等自然因素等变化强度与脆弱性变化显著相关。本研究通过地形、气温和降

水等自然因子相关数据进行分析,松嫩平原的不同地区的气温降水等自然因子不同,这导致该地区的水热平衡也存在较大的差异,这对研究区的生态环境变化具有深远的影响,进而改变了该地区生态系统过程,该结论也印证了前人得出松嫩平原地区的生态脆弱区的结论。如张良侠等^[30]对黄土高原区生态系统的脆弱性进行研究后,认为植被覆盖度和降水等自然因子是导致黄土高原区生态脆弱性时空变化的主要驱动因子,且不同地区和不同土地利用类型脆弱性差异较大。因此本研究结果表明自然因素对松嫩平原的生态脆弱性的影响具有一定的说服力^[31]。

4.2 生态脆弱性人文因子驱动力分析

人类活动也是影响生态脆弱性的因子^[32]。研究表明,由于人类活动的影响和社会经济的发展导致土地的利用类型发生剧烈的变化,进一步影响了松嫩平原的生态脆弱性,该结论与前人的研究结论一致^[33]。如田盛等^[34]利用RS与GIS技术,对环杭州湾土地利用变化进行生态脆弱性评价,研究结果表明环杭州湾耕地面积减少建筑用地面积大幅增加,导致城市化进程加快。本研究表明,松嫩平原生态脆弱性的变化,可能与松嫩平原耕地面积不断扩张有关。耕地和建筑用地的变化是人类活动对生态环境影响后的映射,由于人类活动的加剧,耕地和建设用地的面积变化较大。松嫩平原特殊的地理位置以及近年来该地区人口数量的不断增长,大面积的林地、草地、水域转化为耕地和建设用地,这表明社会经济与城乡建设不断发展,城市化进程加快,人类活动影响越来越强烈,这与前人的研究结果一致^[35]。如周岩等^[36]利用层次分析法对中国辉南县生态脆弱性时空变化进行评估,证明土地利用变化空间分布差异对生态环境脆弱性具有重要影响,林地面积减小转变为耕地和建设用地,导致生态环境脆弱性发生改变。近年来,中国对“山水田林湖草”等进行系统性保护和恢复措施,通过协调松嫩平原农业生产与生态脆弱性间的平衡,采取正确的适当的措施抑制生态脆弱性上升的趋势,这符合国家政策对于生态建设和环境保护的支持^[37]。

4.3 松嫩平原生态环境优化策略

松嫩平原是复杂的自然—经济—社会复合体,在该区应继续维持其生态保护政策,本着“绿水青山就是金山银山”的发展理念,加强宣传教育,增强群众的保护意识,创建全民保护环境的良好氛围^[38];严格控制人类过度开垦林地、草地、水域等行为造成土壤退化、植被覆盖度降低和地表径流减少等现象;继续实施设立生态育林,把握农林牧业结构;在耕作的基础上也应该保护土壤环境质量,保持生态系统的稳定

性,加强土地利用和区域生态治理的综合性规划,促进区域综合发展,实施退耕还林还草还牧还湖等生态工程^[39],以维护生态环境稳定性;同时,注意充分利用太阳能、地热能、风能等各种自然资源,促进区域生态系统的功能整合和社会—生态—经济的协调发展。

5 结论

松嫩平原生态环境脆弱性整体以极度、重度和中度脆弱性为主,三者的面积均超过研究区面积的66.08%。1980—2020年,松嫩平原生态脆弱性总体呈现先增加后降低的趋势,以2000年为分水岭,1980—2000年生态脆弱性呈现增加趋势。而2000—2020年生态脆弱性呈现降低趋势,这表明松嫩平原生态系统稳定性以及环境状况明显好转。

松嫩平原生态脆弱性呈现出自西向东逐渐减弱的趋势。研究期内,松嫩平原生态脆弱性轻度和中度脆弱性面积变化较大,变幅分别为62.19%和91.30%。生态环境脆弱性存在着显著的空间自相关性,且为显著的正相关,空间集聚性特征也有所迁移和扩张。

松嫩平原生态脆弱性时空变异,主要受该地区自然因素和人类活动共同影响。从数理统计分析结果看,生态脆弱性的变化与气温、降水的变化显著相关。同时,应该指出,社会经济因素对生态脆弱性起到促进作用,其影响有逐渐加强的趋势。

松嫩平原生态脆弱性评价是一个复杂的过程,由于生态系统本身的复杂性和不确定性,目前构建生态脆弱性评价体系时选取的多个生态指标难以进行实地验证。因此,在未来的研究中,要想更加全面地反映松嫩平原的生态脆弱性,应完善生态脆弱性的理论研究,因地制宜采用科学技术方法探索生态脆弱性的实地验证方法,从而提高生态系统的应对外界环境能力。

[参 考 文 献]

- [1] 王鹏,赵微,柯新利.基于SRP模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变[J].水土保持研究,2021,28(5):347-354.
- [2] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于RESI的漓江流域生态环境质量动态监测[J].中国水土保持科学,2021,19(1):122-131.
- [3] 李洪广,周旭,肖杨,等.基于SRP模型的西南喀斯特山区生态脆弱性时空变化特征[J].生态科学,2021,40(3):238-246.
- [4] Okey T A, Agbayabi S, Alidina H M. Mapping ecological vulnerability to recent climate change in Canada's Pacific marine ecosystems[J]. Ocean & Coastal Man-

- agement, 2015, 106: 35-48.
- [5] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 等. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5970-5981.
- [6] Ippolito A, Sala S, Fabeer J H, et al. Ecological vulnerability analysis: a river basin case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 3880-3890.
- [7] 张金茜, 李红瑛, 曹二佳, 等. 多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2897-2906.
- [8] 鄢继尧, 赵媛. 近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2020, 43(4): 74-85.
- [9] 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4707-4719.
- [10] 孙宇晴, 杨鑫, 郝利娜. 基于 SRP 模型的川藏线 2010—2020 年生态脆弱性时空分异与驱动机制研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 201-208.
- [11] 黄光球, 刘权宸, 陆秋琴. 基于状态 Petri 网的矿区生态环境脆弱度动态评价方法[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1583-1588.
- [12] 郭嘉豪, 王会肖, 赵茹欣, 等. 基于最优拟合函数的 SPI 指数的松嫩平原干旱特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 240-249.
- [13] 相恒星, 张健, 王宗明, 等. 松嫩平原生态系统服务供需研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1769-1776.
- [14] 路中, 雷国平, 张露洋, 等. 1961—2016 年松嫩平原月尺度下水分盈亏态势时空分异特征[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(4): 459-469.
- [15] 王子龙, 孙建, 姜秋香, 等. 松嫩平原黑土区有机质空间分布特征及影响因素[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(10): 54-62.
- [16] 后小仙, 陈琪, 郑田丹. 财政分权与环境质量关系的再检验: 基于政府偏好权变的视角[J]. 财贸研究, 2018, 38(3): 87-98.
- [17] 肖佳媚, 杨圣云. PSR 模型在海岛生态系统评价中的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 191-196.
- [18] 周炳中, 杨浩, 包浩生, 等. PSR 模型及土地可持续利用评价中的应用[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 541-548.
- [19] 王志杰, 苏嫒. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 432-442.
- [20] 刘江, 谢遵博, 王千慧, 等. 北方防沙带东部区生态安全格局构建及优化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3412-3423.
- [21] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5460-5472.
- [22] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2558-2572.
- [23] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [24] 郭泽呈, 魏伟, 石培基, 等. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1948-1965.
- [25] 罗庆, 李小建, 杨慧敏. 中国县域经济空间分布格局及其演化研究: 1990—2010 年[J]. 经济经纬, 2014, 31(1): 1-7.
- [26] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 等. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4155-4166.
- [27] 朱琪, 王亚楠, 周旺明, 等. 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3474-3482.
- [28] Mahapatra M, Ramakrishnan R, Rajawat A S. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(1): 139-159.
- [29] 郭兵, 孔维华, 韩芳, 等. 北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性变化遥感监测及其驱动机制分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(1): 1-12.
- [30] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 等. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4902-4910.
- [31] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, et al. Using RS/GIS for spatiotemporal ecological vulnerability analysis based on DPSIR framework in the Republic of Tatarstan, Russia [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 67: 1-11.
- [32] 黄越, 程静, 王鹏. 中国北方农牧交错区生态脆弱性时空演变格局与驱动因素: 以盐池县为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1175-1185.
- [33] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1288-1300.
- [34] 田盛, 桂峰, 王柳柱, 等. 环杭州湾土地利用变化与生态脆弱性评价[J]. 国土与自然资源研究, 2021(6): 17-23.
- [35] 刘丹, 李琳娜. 1995—2015 年中国北方边境样带土地利用时空格局演变及驱动因素[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1208-1221.
- [36] 周岩, 张艳红, 翟羽娟. 基于土地利用变化的辉南县生态脆弱性时空变化分析[J]. 国土与自然资源研究, 2013(6): 29-32.
- [37] 曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 等. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系: 基于连片特困区 714 个贫困县的实证分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2614-2622.
- [38] 于恩逸, 齐麟, 代力民, 等. “山水林田湖草生命共同体”要素关联性分析: 以长白山地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8837-8845.
- [39] 段丽杰, 庄雨适, 孙大光. 长白山生物多样性保护优先区(吉林区域)现状、问题与对策[J]. 环境保护, 2019, 47(13): 57-60.