

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.012.

石淞, 李文, 林晓鹏, 等. 黑龙江省植被 NDVI 时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 294-305.

SHI Song, LI Wen, LIN Xiaopeng, et al. Spatiotemporal Variations of Vegetation NDVI and Influencing Factors in Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 294-305.

黑龙江省植被 NDVI 时空变化及影响因素

石 淞, 李 文, 林晓鹏, 翟育涔, 丁一书

(东北林业大学 园林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: [目的]探究黑龙江省植被动态变化及其影响因素,为区域生态环境恢复与治理提供科学依据。[方法]基于 2000—2020 年 MODIS NDVI 数据,辅以同期气象数据,运用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析、Hurst 指数、偏相关分析、残差分析及相对作用分析法,深入解析了黑龙江省植被时空变化特征及其对气候变化和人类活动的响应机制,并定量厘清不同情景下气候变化和人类活动在植被变化过程中的相对作用。[结果](1) 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 以 $0.028/10\text{ a}$ ($p < 0.001$) 的速率波动增长,具有“西南低,中部和东南高”的空间分布格局且垂直地带性明显,21 年间 NDVI 改善区域面积远大于退化区域面积。研究区 NDVI 未来变化趋势以持续改善为主,占总面积的 82.367%; (2) 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 与气温、降水和相对湿度呈正相关,与日照时数呈负相关,其中降水对 NDVI 的影响作用最强。人类活动对 NDVI 呈积极影响的区域占比 89.549%,整体上促进了黑龙江省植被生长; (3) 气候变化和人类活动对 NDVI 变化的相对作用表现出明显的空间异质性,其中气候变化是黑龙江省 NDVI 改善的主要驱动因素,而人类活动对 NDVI 退化的作用略高于气候变化,两者基本持平。[结论]近 21 年来黑龙江省植被状况总体向好发展,其变化受气候变化和人类活动共同影响,未来应因地制宜地提升植被对气候变化的适应性并最大限度减轻人类活动对生态环境的损害。

关键词: 黑龙江省; NDVI; 时空变化; 气候变化; 人类活动; 相对作用

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0294-12

Spatiotemporal Variations of Vegetation NDVI and Influencing Factors in Heilongjiang Province

SHI Song, LI Wen, LIN Xiaopeng, ZHAI Yucen, DING Yishu

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the dynamic changes of vegetation in Heilongjiang Province and its influencing factors, and to provide a scientific basis for the restoration and management of the regional ecological environment. [Methods] Spatiotemporal variations of vegetation NDVI and its response mechanism to climate change and human activities in Heilongjiang Province were analyzed in depth using method of Sen + Mann-Kendall trend analysis, Hurst index, partial correlation analysis, residual analysis and relative role analysis based on MODIS NDVI data and meteorological data from 2000 to 2020. At the same time, the relative roles of climate change and human activities in the process of vegetation change in different situations were determined quantitatively. [Results] (1) NDVI in Heilongjiang Province fluctuated growth at a rate of $0.028/\text{decade}$ ($p < 0.001$) from 2000 to 2020, with a spatial distribution pattern of low in the southwest and high in the central and southeast and obvious vertical zonality, the area of NDVI improvement was much larger than the area of degradation during 21 years. The future trend of NDVI change in the study area is mainly continuous improvement, accounting for 82.367% of the total area. (2) NDVI was positively correlated with temperature, precipitation and relative humidity, and negatively correlated with

收稿日期: 2022-06-24

修回日期: 2022-07-15

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2022E001); 中央高校基本科研业务费项目(41421016); 国家自然科学基金项目(42171246)

第一作者: 石淞(1995—), 女(满族), 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事区域环境变化与生态修复研究。E-mail: hongyanhaibo@nefu.edu.cn

通信作者: 李文(1971—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士生导师, 主要从事城市生态修复与规划研究。E-mail: liwen@nefu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

sunshine hours in Heilongjiang Province from 2000 to 2020, precipitation had the strongest effect on NDVI, the areas where human activities had a positive impact on NDVI accounted for 89.549% of the total area, which promoted the vegetation growth in Heilongjiang Province overall. (3) The relative roles of climate change and human activities on NDVI changes showed obvious spatial heterogeneity, where climate change was the main driver of NDVI improvement in Heilongjiang Province, while the role of human activities on NDVI degradation was slightly higher than that of climate change, and the two were basically equal. [Conclusion] In the past 21 years, the vegetation condition in Heilongjiang Province had generally improved, and its variations had been influenced by both climate change and human activities. In the future, we should improve the adaptation of vegetation to climate change according to local conditions and minimize the ecological damage caused by human activities.

Keywords: Heilongjiang Province; NDVI; spatiotemporal variation; climate change; human activities; relative role

植被作为陆地生态系统的主体,对碳平衡调控、物质能量循环及维持气候稳定起重要作用^[1-2]。监测植被动态并探索植被生长与气候变化和人类活动间的响应关系,是全球变化研究中持续关注的热点问题,深刻影响着地球健康与人类福祉^[3]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)具有物理意义明确、消除辐射误差、对植被响应能力强等优势,已作为表征地表植被覆盖的指标广泛应用于植被格局变化^[4]、植被生产力估算^[5]、生态成效评估等^[6]研究领域。

国内外学者在不同尺度上对植被动态变化及其影响因素的研究已有丰硕成果。大量学者采用小波分析^[7]、Slope 趋势分析^[8]、CV 变异系数^[9]、Hurst 指数等^[10]方法对植被时空变化特征进行分析。Kong^[11]、Baniya^[12]、Verhoeven 等^[13]指出近 40 年全球范围内植被呈稳中递增态势,在北半球中高纬度地区增长趋势尤为显著,在我国西北干旱区^[14]、京津冀风沙区^[15]、黄土高原^[16]、青藏高原^[17]、辽河流域等^[18]地的研究中有类似结论。植被变化影响因素方面,现有研究主要运用地理探测器^[19]、面板数据模型构建^[20]、残差分析等^[21]方法,从气候条件、人类活动、地形因子等角度探究植被变化与它的响应关系。研究表明^[22],植被的改善与退化是气候变化和人类活动交互作用的结果,气候变化为内在驱动力,而人类活动作为外部驱动力在不同程度上缓解或加剧气候变化的影响。

黑龙江省是我国“两屏三带”生态安全战略格局中“东北森林带”的核心组成部分,是全球变化响应的敏感区和脆弱区,也是保障国家生态安全、粮食安全和推动东北地区高质量发展的重要区域。过去几十年,在水热条件改变和开发建设加剧的双重作用下,黑土地退化^[23]、草地荒漠化^[24]、水土流失等^[25]生态环境问题凸显。同时,三北防护林建设、退耕还林草、天然林保护等

生态修复工程的实施使黑龙江省植被状况得到改善^[26]。目前,针对黑龙江省植被的研究已取得长足进展,刘文彬等^[27]对黑龙江省植被 NDVI 变化趋势进行分析,表明植被呈波动上升态势,但变化幅度不大,区域差异明显;张晓慧^[28]的研究表明,黑龙江省植被 NDVI 与气温呈微弱正相关,与降水呈负相关,且对降水的响应强于温度;赵梦溪^[29]的研究发现,社会经济与农林业的发展是人类活动驱动黑龙江省植被覆盖变化的 2 大主成分,且影响程度逐渐加强。

已有研究中考虑的气候因子多为气温和降水,忽略了日照时数、相对湿度等其他气候因子对植被生长的影响。且多侧重定性讨论,未能将气候变化和人类活动对植被变化的影响进行定量分离。鉴于此,本文基于 2000—2020 年 MODIS NDVI 数据,采用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析和残差分析等方法,探讨黑龙江省 21 a 间植被 NDVI 时空变化特征,揭示 NDVI 与气候变化和人类活动的响应关系,并定量评估不同情景下气候变化和人类活动在植被改善与退化过程中的相对作用,以为黑龙江省植被资源修复和生态政策制定提供科学依据。

1 研究区概况

黑龙江省(43°26′—53°33′,121°11′—135°05′)地处我国东北边疆,下辖 13 个地级行政区,总面积约 47.30 万 km²。研究区地势呈现“西北和东南高,东部和西南低”的格局,可划分为“四岭”(大兴安岭、小兴安岭、张广才岭、老爷岭)、“一山”(完达山)、“两平原”(松嫩平原、三江平原)。属寒温带与温带大陆性季风气候,由东向西跨越湿润、半湿润与半干旱区,四季分明,雨热同期。年均温约为-4~5℃,北部冻土区冬季气温可低至-40℃,年降水量约为 400~700 mm。作为我国最大的林业省份之一,森林覆盖率高

达43.60%,植被地带性分布明显,主要有寒温带针叶林、温带针阔混交林、草原草甸等。依托生态系统资

源禀赋优势,省内包含水源涵养、生物多样性保护、洪水调蓄与土壤保持等多处重要生态功能区(图1)。

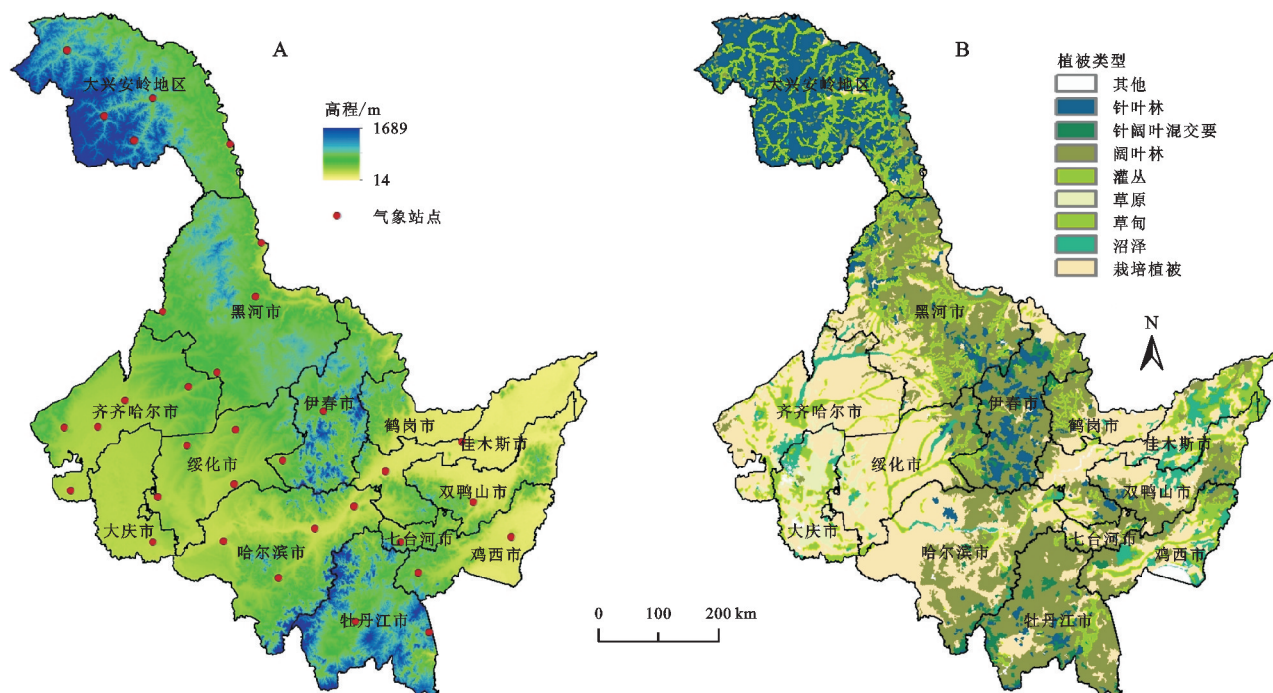


图1 黑龙江省高程、气象站点(A)与植被类型(B)分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

NDVI数据选取2000年2月—2020年12月MODIS13Q1产品,来源于美国航空航天局NASA(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率16 d,空间分辨率250 m。使用MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对数据进行波段提取、批量拼接、格式转换、重投影等操作,采用最大值合成法(MVC)消除异常值、云层、重气溶胶和太阳高度角等因素的干扰,利用研究区矢量边界裁剪得到月、年尺度NDVI数据集。本研究采用年最大NDVI数据进行分析,可有效反映植被覆盖情况,将年最大NDVI值<0.1的区域定义为无植被区,不参与计算,以减少裸土、沙漠、水体、积雪的影响。

气象数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),选取黑龙江省内及其周边共56个气象站点的气温、降水、日照时数和相对湿度数据,运用R语言将其转化为标准单位并采取均值替换法对个别台站的异常值和缺失值进行插补。采用AUNSPIN软件,引入DEM作为协变量,基于薄盘样条函数理论对气象数据进行空间插值。DEM高程数据(STRM 90 m)、植被类型数据(1:100万中国植被图集)与土地利用数据(2000年和2020年2期)均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。利用Arc-

GIS 10.8将所有影像定义相同的空间参考(WGS84_UTM_Zone_52 N)与分辨率(1 km)。

2.2 研究方法

2.2.1 Sen + Mann-Kendall 趋势分析 Theil-Sen Median 斜率估计抗噪性强,能够规避异常值、测量误差及离散数据的干扰,较Slope分析更为稳健,已成为判断植被、水文、气象等长时间序列变化特征的重要方法^[30]。公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right) \quad 2000 \leq i < j \leq 2020$$

式中: β 表示NDVI变化趋势;median为中值函数;NDVI_i,NDVI_j分别为不同年份的NDVI值。当 $\beta > 0$,表示NDVI呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

利用Mann-Kendall方法^[21]对Sen斜率估计结果进行非参数显著性检验。公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases}$$

式中: Z 为检验统计量; var 为方差函数; sgn 为符号函数; n 为时序长度。对于给定的显著性水平 α , 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝零假设, 表示 NDVI 时间序列存在显著变化, 反之则为不显著变化。本文取 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 为显著性水平数值, 即当 $|Z| > 1.96, 2.58$ 时, 代表通过置信度为 95%, 99% 的显著性检验。

2.2.2 Hurst 指数 基于重标极差 (R/S) 分析法的 Hurst 指数能够定量描述时间序列信息的持续性, 并对其未来演变趋势进行预测^[31]。原理如下:

$$\{\text{NDVI}(t)\} \quad t=1, 2, \dots, n$$
$$\langle \text{NDVI} \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \text{NDVI}(t) \quad \tau=1, 2, \dots, n$$
$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (\text{NDVI}(i) - \langle \text{NDVI} \rangle_{\tau}) \quad 1 \leq t \leq \tau$$
$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} [X(t, \tau)] - \min_{1 \leq t \leq \tau} [X(t, \tau)]$$
$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [(\text{NDVI}(t) - \langle \text{NDVI} \rangle_{\tau})^2] \right\}^{\frac{1}{2}}$$
$$R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$$

式中: $\{\text{NDVI}(t)\}$, $\langle \text{NDVI} \rangle_{\tau}$, $X(t, \tau)$, $R(\tau)$, $S(\tau)$ 分别为 NDVI 时间序列、均值序列、累积离差序列、极差序列、标准差序列; H 为 Hurst 指数。

当 $H=0.5$, 表明时间序列变化随机; 当 $0 \leq H < 0.5$, 表明未来变化趋势与过去相反, H 值越接近 0, 反持续性越强; 当 $0.5 < H \leq 1$, 表明未来变化趋势与过去相同, H 值越接近 1, 持续性越强。

2.2.3 偏相关分析 借助三阶偏相关分析, 通过控制其他变量的影响分别表征 4 类气候因子与 NDVI

之间的相关关系, 并通过 t 检验对偏相关结果进行显著性分析^[32]。公式如下:

$$R_{ab \cdot cde} = \frac{R_{ab \cdot cd} - R_{be \cdot cd} R_{ae \cdot cd}}{\sqrt{(1 - R_{be \cdot cd}^2)(1 - R_{ae \cdot cd}^2)}}$$
$$t = \frac{R_{ab \cdot cde}}{\sqrt{(1 - R_{ab \cdot cde}^2)}} \sqrt{n - m - 1}$$

式中: $R_{ab \cdot cde}$ 为控制变量 c, d, e 的影响下, 变量 a 与 b 的偏相关系数; $R_{ab \cdot cd}$, $R_{be \cdot cd}$, $R_{ae \cdot cd}$ 分别为控制变量 c, d 的影响下, 变量 a 与 b , b 与 e , a 与 e 的偏相关系数; n 为样本数; m 为自变量个数。

2.2.4 残差分析 基于 Matlab2016 年矩阵函数, 在像元空间尺度上构建 NDVI 实测值与各气候因子的多元回归模型, 得到气候变化影响下的 NDVI 预测值, 将其与 NDVI 实测值的差值视为人类活动影响下的 NDVI^[33]。公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{pre}} = a + b \times T + c \times P + d \times S + e \times R$$
$$\text{NDVI}_{\text{res}} = \text{NDVI}_{\text{act}} - \text{NDVI}_{\text{pre}}$$

式中: a 为回归常数项; T, P, S, R 分别为气温、降水、日照时数、相对湿度; b, c, d, e 分别为各气候因子的回归系数; NDVI_{act} , NDVI_{pre} , NDVI_{res} 分别为 NDVI 实测值、预测值、残差值。当 $\text{NDVI}_{\text{res}} > 0$, 表示人类活动对 NDVI 有积极影响, 反之则为消极影响。

2.2.5 相对作用 分析结合 NDVI 变化区域的 NDVI 预测值趋势 $\beta_{\text{NDVI}_{\text{pre}}}$ 和 NDVI 残差值趋势 $\beta_{\text{NDVI}_{\text{res}}}$ 数据, 建立不同情景下气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化相对作用的评价方法^[34], 具体见表 1。

表 1 不同情景下气候变化和人类活动在植被 NDVI 变化过程中的相对作用评价方法

情景	$\beta_{\text{NDVI}_{\text{pre}}}$	$\beta_{\text{NDVI}_{\text{res}}}$	气候变化的相对作用/%	人类活动的相对作用/%	说明	
NDVI 改善区域	情景 1	>0	>0	$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }$	$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }$	气候变化和人类活动共同促进 NDVI 改善, 以其各自 NDVI 变化量所占百分比为各自的相对作用
	情景 2	>0	<0	100	0	气候变化综合作用促进 NDVI 改善
	情景 3	<0	>0	0	100	人类活动综合作用促进 NDVI 改善
	情景 4	<0	<0	—	—	误差
NDVI 退化区域	情景 1	<0	<0	$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }$	$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{res}} }$	气候变化和人类活动共同导致 NDVI 退化, 以其各自 NDVI 变化量所占百分比为各自的相对作用
	情景 2	<0	>0	100	0	气候变化综合作用导致 NDVI 退化
	情景 3	>0	<0	0	100	人类活动综合作用导致 NDVI 退化
	情景 4	>0	>0	—	—	误差

注: $\beta_{\text{NDVI}_{\text{pre}}}$ 为 NDVI 预测值趋势; $\beta_{\text{NDVI}_{\text{res}}}$ 为 NDVI 残差值趋势; $\Delta \text{NDVI}_{\text{pre}}$ 为 $t+i$ 时刻与 t 时刻 NDVI_{pre} 的差值; $\Delta \text{NDVI}_{\text{res}}$ 为 $t+i$ 与 t 时刻 NDVI_{res} 的差值。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空变化特征

3.1.1 时间变化 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 整体呈波动上升趋势, 增长率为 0.028/10 a ($p < 0.001$), 说明

退耕还林草、封山育林等生态工程成果逐步显现, 植被覆盖显著提升, 但 2007 年 NDVI 出现明显下降趋势, 与黑龙江省 2007 年遭遇严重旱情灾害与异常夏热事件有关^[35-36]。21 年间黑龙江省 NDVI 均值为 0.856, 2000 年 NDVI 均值最小, 为 0.823, 2020 年

NDVI 均值最大,为 0.885。各行政区划单元中,大庆市上升趋势最为显著,为 0.070/10 a,齐齐哈尔市和绥化市次之,分别为 0.053/10 a,0.038/10 a,牡丹江市和鸡西市变化趋势较不明显,增长率分别为 0.015/10 a,0.018/10 a。伊春市 21 a 间植被覆盖状况优于其他行政区划单元,NDVI 均值最高,为 0.894,牡丹江市和双鸭山市次之,分别为 0.883,0.876,大庆市 NDVI 均值最低,仅为 0.696(图 2)。

3.1.2 空间分布 黑龙江省 2000—2020 年 NDVI 多年均值的范围为 0.157~0.952,其中 NDVI 均值>0.8 的区域占比达 88.043%,表明黑龙江省植被覆盖状况整体处于较高水平。NDVI 空间格局呈“西南低、中部和东南高”特征,地域性差异明显,主要原因与植被类型分布密切相关,中部及东南部的小兴安岭、张广才岭、完达山以针阔叶混交林和落叶阔叶林为主,西北部大兴安岭地区以针叶林为主,而西南部的松嫩平原以栽培植被和草地为主,因此山区 NDVI 均值明显高于平原地区。大庆市、齐齐哈尔市及哈尔滨市部分地区 NDVI 低值集中,主要原因可能与农牧交错带土地荒漠化以及城市主城区高强度开发有关。

NDVI 垂直变化特征大致可分为 3 个阶段:第一阶段($\leq 150\text{m}$),植被面积占比 23.408%,NDVI 均值呈波

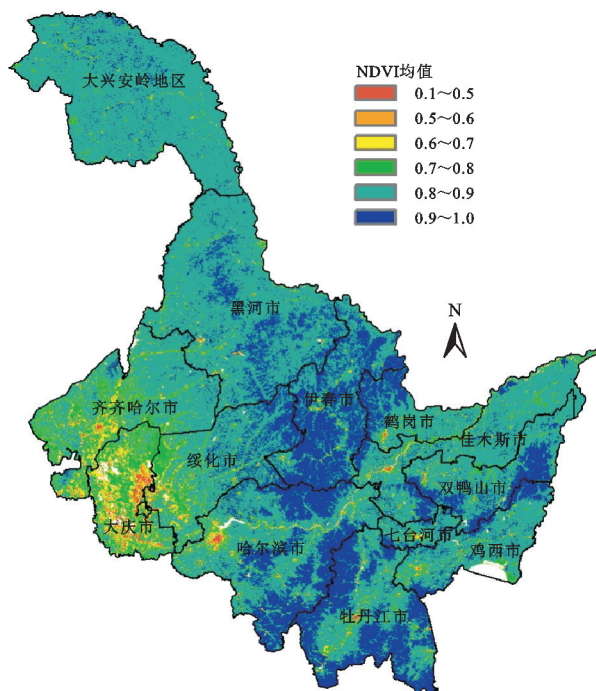


图 3 黑龙江省 NDVI 空间分布及垂直变化特征

3.1.3 空间变化 结合 Sen 趋势 β 值与 M-K 检验 $|Z|$ 值,将 NDVI 变化趋势划分为明显、一般、轻微的改善与退化,以及基本稳定 7 类。2000—2020 年黑龙江省 NDVI 空间变化趋势以明显改善为主,占总面积的 49.331%,主要分布齐齐哈尔市、伊春市、大兴安岭地区

动下降趋势,与此范围内用地多为耕地和草地,受人类活动干扰程度较高有关;第二阶段(150~600 m),植被面积占比最多,为 65.067%,是植被分布的主要海拔区段,表明此范围内水热状况与土壤养分条件较好,适宜植被生长发育。NDVI 均值呈急剧上升后平稳增加趋势,与此范围内耕地减少而林地增多且植被类型逐渐多样化有关;第三阶段($> 600\text{m}$),植被面积占比低至 10.572%,NDVI 均值呈下降趋势,主要原因为高海拔地区植被生长受自然环境限制,植被类型相对单一。总体来看,黑龙江省植被分布垂直地带性明显,植被面积和 NDVI 均值随海拔升高分别表现为“先增加后减少”和“减—增—减”的趋势(图 3)。

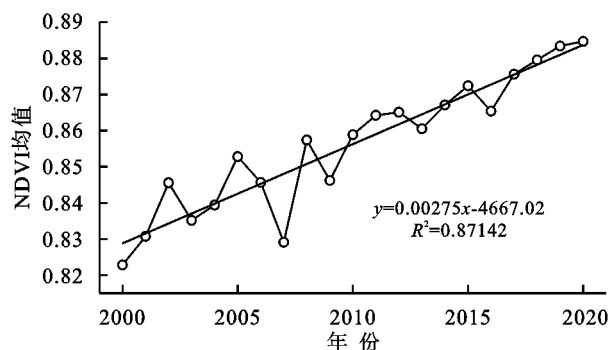
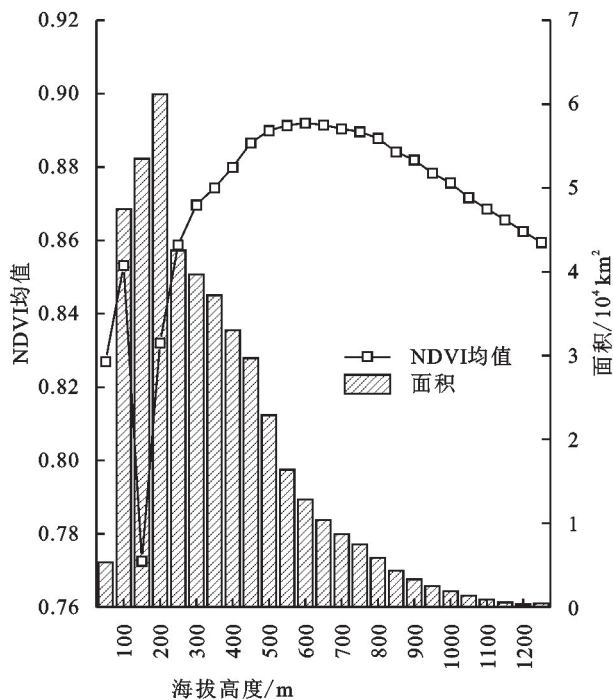


图 2 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 年际变化



北部、哈尔滨市北部及绥化市西南部。轻微改善和一般改善次之,分别占比 22.564%,19.177%,主要分布在黑河市、佳木斯市、双鸭山市等地。明显退化和一般退化部分占比极少,分别为 0.379%,0.422%。总体来看,21 年间黑龙江植被 NDVI 改善趋势显著,改善

面积总计 40.943 万 km², 占比高达 91.072%, 仅有 3.381% 的区域呈退化趋势, 零星分布于大庆市东北部、哈尔滨市西部、鸡西市东南部等地, 主要原因一方

面与半干旱地区气候条件相对恶劣有关, 另一方面是由于过度放牧、盲目开荒以及城市扩张导致土地沙化和建筑用地增加, 对植被的干扰增大(图 4, 表 2)。

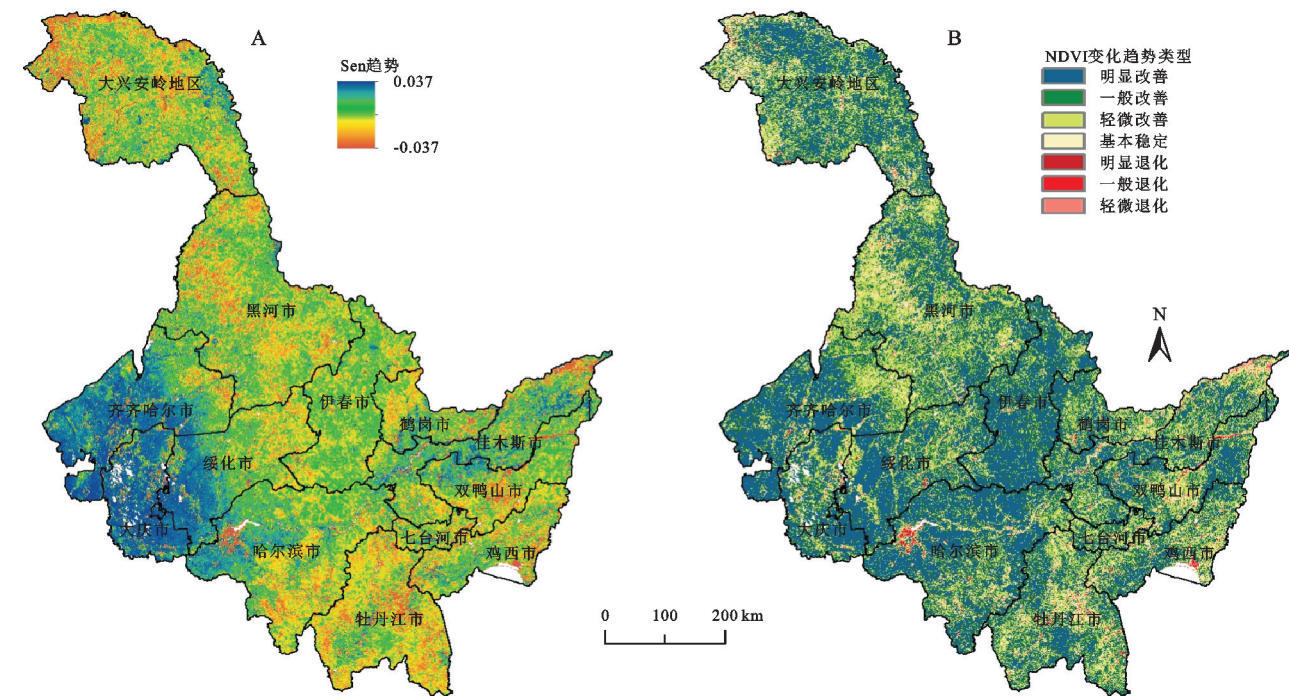


图 4 2000—2020 年黑龙江省 NDVI Sen 趋势(A)与变化趋势类型(B)空间分布

表 2 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 变化趋势类型统计			
变化趋势类型	划分依据	面积/km ²	占比/%
明显改善	$\beta > 0.0005, Z \geq 2.58$	221779	49.331
一般改善	$\beta > 0.0005, 1.96 \leq Z < 2.58$	86213	19.177
轻微改善	$\beta > 0.0005, Z < 1.96$	101442	22.564
基本稳定	$-0.0005 \leq \beta \leq 0.0005$	24936	5.547
明显退化	$\beta < -0.0005, Z \geq 2.58$	1703	0.379
一般退化	$\beta < -0.0005, 1.96 \leq Z < 2.58$	1899	0.422
轻微退化	$\beta < -0.0005, Z < 1.96$	11599	2.580

2000—2020 年黑龙江省各行政区划单元 NDVI 变化趋势存在不同程度差异, 但整体趋同, 均为改善面积大于退化面积, 且均以明显改善为主。伊春市、齐齐哈尔市、绥化市改善成效更为显著, 改善面积分别占其总面积的 96.828%, 95.653%, 94.274%, 其中伊春市明显改善区域占比最高, 为 67.667%。鸡西市、佳木斯市、双鸭山市退化面积仍分别有 1 300 km², 1 837 km², 1 216 km², 分别占其总面积的 6.126%, 5.703%, 5.320%, 高于其他行政区划单元, 植被退化形势依然严峻。鸡西市和哈尔滨市明显退化区域分别占其总面积的 0.858%, 0.701%, 退化程度最强(图 5)。

3.1.4 未来趋势 黑龙江省 NDVI 的 Hurst 指数均值为 0.598(0.246~0.770), 正态分布表现为右单峰偏斜, 其中 Hurst 值 > 0.5 的像元数占比 88.222%, 表明植被变化整体趋向持续性, 即未来大部分区域

NDVI 变化趋势与过去相同。结合 Hurst 指数计算实际情况, 将其划分为强反持续性、弱反持续性、弱持续性与强持续性 4 个等级, 其中弱持续性占比最多, 为 60.293%, 分布较为广泛; 强持续性次之, 占比 27.929%, 主要分布在伊春市、齐齐哈尔市西南部、绥化市西部等地; 强反持续性与弱反持续性区域分布较少且相对分散, 分别占比 0.187%, 11.591%(图 6)。

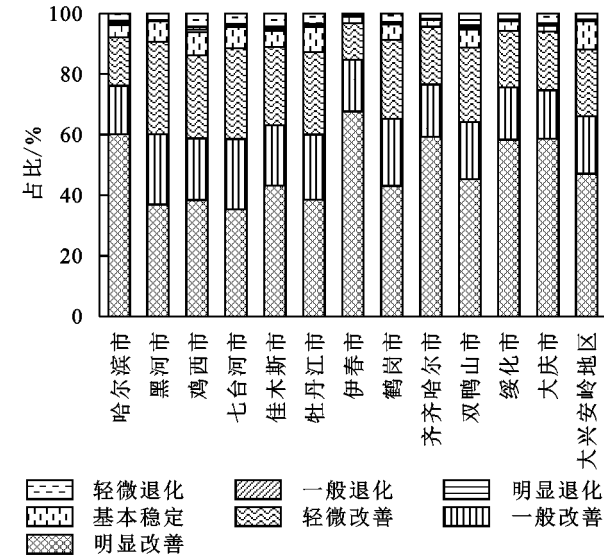


图 5 2000—2020 年黑龙江省各行政区划单元 NDVI 变化趋势类型统计

为进一步明确黑龙江省 NDVI 未来发展规律, 将 NDVI 变化趋势与 Hurst 指数空间分布进行耦合

叠加,共分为9种情况。其中弱持续性改善面积为24.881万 km^2 ,占比最高,为55.344%,强持续性改善占比次之,为27.023%,这些区域主要分布在伊春市、齐齐哈尔市、绥化市、哈尔滨市及大兴安岭地区。其余各情况面积较少,占比均在9%以下。总体来看,黑龙江省NDVI处于稳中向好的发展态势,未来趋势多为持续改善,占比82.367%,其中以弱持续性改善居多,持续退化以及由改善转为退化的面积仍有5.131万 km^2 ,占比11.414%,主要分布在黑河市西部、双鸭山市中部、哈尔滨市西部等地,需因地制宜加强这些区域的生态环境治理,降低未来植被退化风险(图7)。

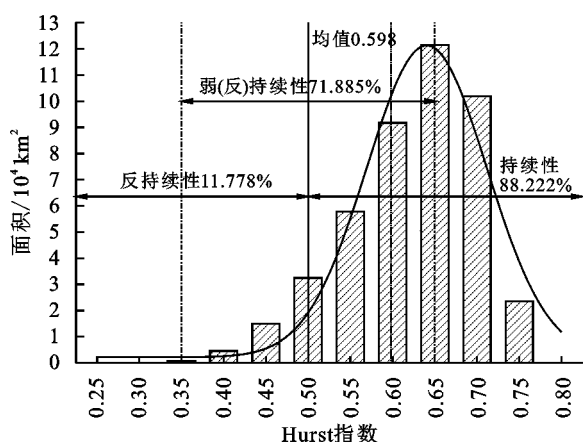
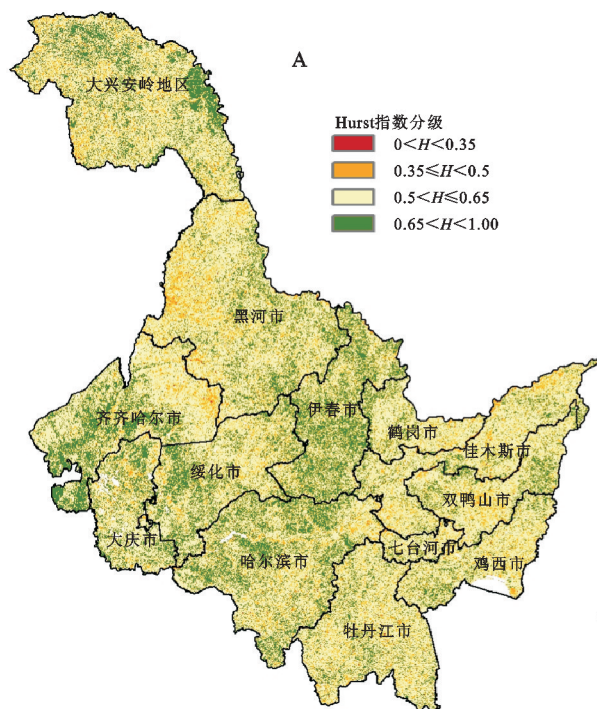


图6 Hurst指数正态分布



3.2 NDVI影响因素分析

3.2.1 气候因素对NDVI的影响 黑龙江省NDVI与气温和降水整体上均呈正相关关系,偏相关系数均值分别为0.141,0.286。研究区72.746%的区域NDVI与气温呈正相关,其中呈显著正相关($p < 0.05$)的区域占比8.286%,主要分布在哈尔滨市西部、绥化市西南部及大兴安岭地区北部等地,NDVI与气温的偏相关系数在空间上表现为“中部和西北高,东南和西部低”的分布格局。中部地区植被覆盖度较高,且地处半湿润区域,降水丰沛,在一定范围内,温度越高,光合作用酶的活性越强,能够加速植物发育;西北部大兴安岭地区地势较高且气温较低,气温升高有利于植被物候期提前,也使得积雪融化补充土壤水分,促进植被生长。NDVI与降水的偏相关关系在空间上呈“中部和西南强,西北和东部弱”的响应特征,呈正相关的区域占比86.210%,其中呈显著正相关($p < 0.05$)的区域占比26.631%,集中分布在伊春市、大庆市、齐齐哈尔市西部、哈尔滨市北部等地,以研究区西南部的松嫩平原为主。松嫩平原整体降水量较低且气温较高,蒸发量相对较大,导致土壤普遍缺墒,因此对降水更为敏感;且该地区农业生产规模大,降水量提升有助于农作物长势良好,其中大庆市以水稻为主要作物,相较于玉米、大豆等对降水的依赖性更强。

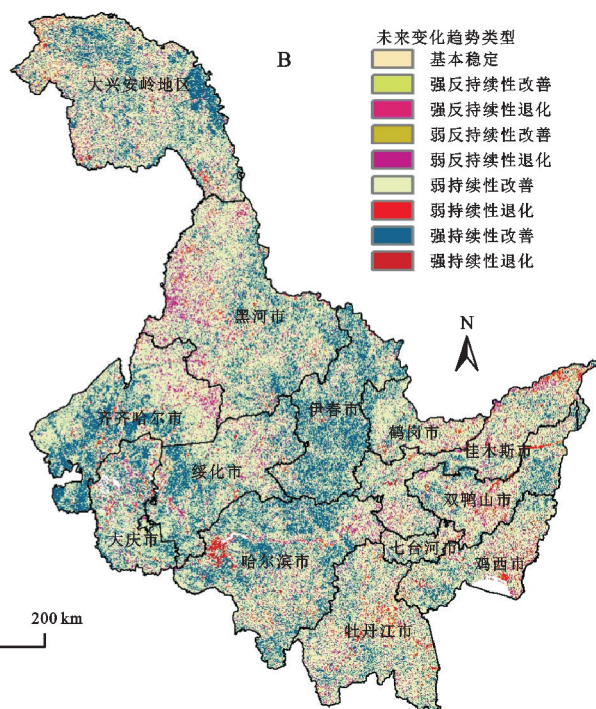


图7 2000—2020年黑龙江省NDVI Hurst指数分级(A)与未来变化趋势类型(B)空间分布

黑龙江省NDVI与日照时数整体呈负相关关系,偏相关系数均值为-0.065,与相对湿度整体呈微弱正相关关系,偏相关系数均值为0.004,空间上分别表现为“两边

高、中间低”和“中间高、西北和东南低”的分布格局。NDVI与日照时数呈负相关的区域占比60.836%,其中呈显著负相关($p < 0.05$)的区域占比3.760%,主要分布

在哈尔滨市西部与西北部、绥化市中部等地。NDVI 与相对湿度呈正相关与负相关的区域分别占比 52.178%, 47.822%, 分布较为均衡, 其中呈显著正相关($p<0.05$)的区域占比 2.368%, 零星分布在哈尔滨市西部、绥化市中部等地, 呈显著负相关($p<0.05$)的区域占比 2.949%, 主要分布在大兴安岭地区北部、佳木斯市东北部、牡丹江市中部与鸡西市东部(图 8, 表 3)。

表 3 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 与气候因子偏相关显著性统计

偏相关显著性	气温		降水	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
显著负相关	2660	0.593	2240	0.499
显著正相关	37191	8.286	119539	26.631
不显著负相关	119672	26.661	59659	13.291
不显著正相关	289344	64.461	267429	59.579

偏相关显著性	日照时数		相对湿度	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
显著负相关	16876	3.760	13239	2.949
显著正相关	6170	1.375	10629	2.368
不显著负相关	256195	57.076	201417	44.872
不显著正相关	169626	37.790	223582	49.810

为分析各气候因子对黑龙江省 NDVI 变化的影响程度, 基于标准化多元线性回归方程, 取回归系数绝对值最大的气候因子作为该像元的主导气候因子。以降水为主导气候因子的区域占比最高, 为 50.043%, 在研究区中部、南部与西南部广泛分布, 说明水分条件是黑龙江省植被生长的关键。以气温为主导气候因子的区域占比次之, 为 23.058%, 主要分布在大兴安岭地区、黑河市北部、哈尔滨市西部及双鸭山市东部等地。分别有 11.303%, 15.595% 的区域以日照时数和相对湿度为主导气候因子, 分布相对分散。不同地区主导气候因子存在差异的主要原因可能与植被类型与区域气候特征有关, 在大兴安岭地区、黑河市等地, 主要分布有大面积针叶林与阔叶林, 森林对维持水平衡具有较强的自我调节能力, 相较于其他植被类型对热量要求更高, 因此这些区域对水分条件的响应不如对光热条件敏感; 而齐齐哈尔市、大庆市等地, 以耕地和草地为主, 蓄水能力较差, 且气候相对干旱干燥, 相较于常年多雨区域, 对降水和相对湿度的响应则更为强烈(图 9)。

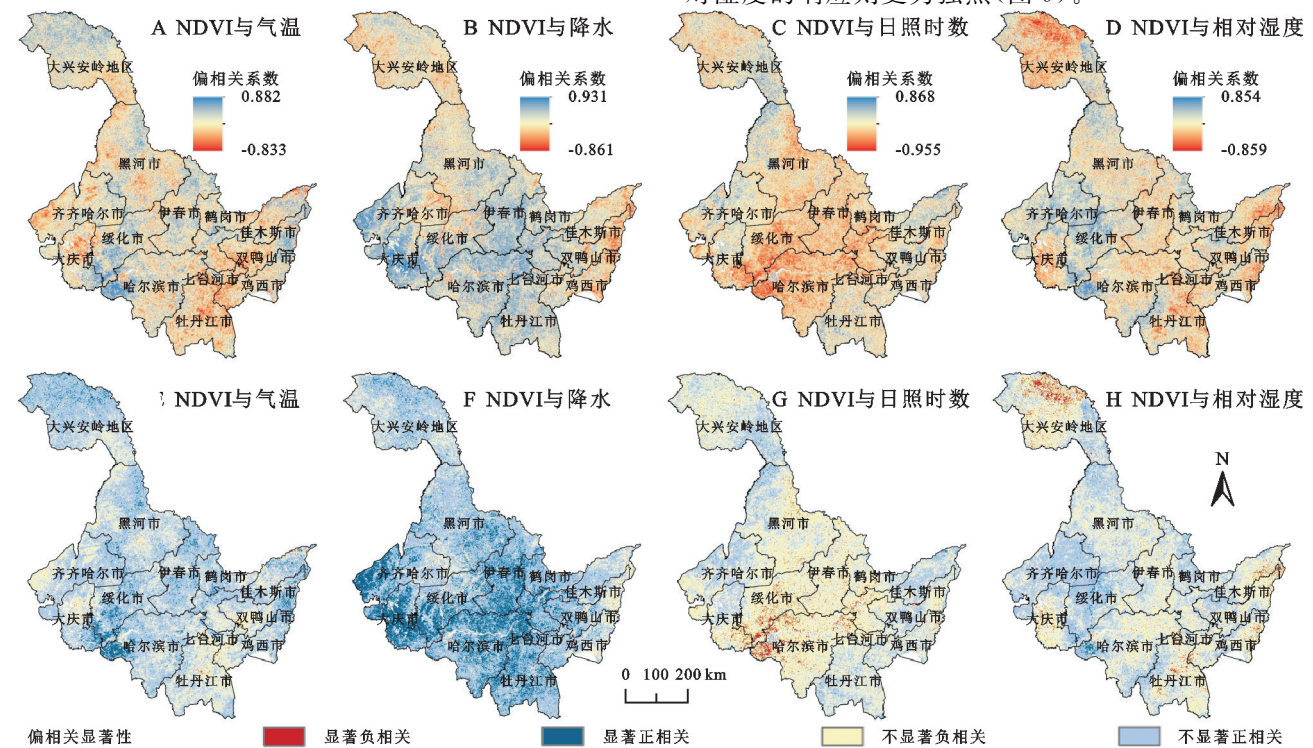


图 8 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 与气候因子偏相关系数(A—D)及偏相关显著性(E—H)空间分布

3.2.2 人类活动对 NDVI 的影响 基于各像元残差分析结果, 对 2000—2020 年残差值时间序列进行趋势及显著性分析以表征 21 a 间人类活动对 NDVI 的影响。2000—2020 年黑龙江省 NDVI 残差趋势为正值的像元面积占总面积的 89.549%, 其中极显著和显著部分分别占比 7.462%, 16.108%, 主要分布在大兴安岭地区东南部、黑河市北部、牡丹江市南部、齐齐哈尔市等地。残差

趋势为负值的像元面积占总面积的 10.451%, 其中极显著和显著部分占比极少, 分别为 0.084%, 0.303%, 残差为负的区域主要分布在哈尔滨市西部、牡丹江市东部、黑河市中北部、佳木斯市东北部等地。总体来看, 人类活动对黑龙江省 NDVI 具有双重影响, 其中积极影响更为明显, 大多数区域的生态保护取得一定成效, 在不同程度上改善了区域植被覆盖状况, 而与此

同时,人类活动在经济发展中的不合理开发对部分地区植被生长的抑制作用同样不可忽视(图 10)。

3.2.3 气候变化和人类活动对 NDVI 变化的相对作用 在 NDVI 改善区域,气候变化和人类活动的相对作用平均值分别为 54.194%, 45.806%, 表明 2000—2020 年气候变化是黑龙江省 NDVI 改善的主要驱动力。空间上以气候变化、人类活动为主导因素(相对作用>50%)促进 NDVI 改善的区域分别占改善区域总面积的 56.495%, 43.505%, 其中以气候变化主导的 NDVI 改善区域主要分布在齐齐哈尔市西南部、绥化市西南部、大兴安岭地区北部及大庆市、伊春市等地;以人类活动主导的 NDVI 改善区域主要分布在齐齐哈尔市东部、绥化市东北部、大兴安岭地区东南部及哈尔滨市中部等地。在 NDVI 退化区域,气候变化和人类活动的相对作用平均值分别为 48.588%, 51.412%, 表明 2000—2020 年人类活动对黑龙江省 NDVI 退化的作用略大于气候变化,两者基本持平。空间上以气候变化、人类活动为主导因素导致 NDVI 退化的区域分别占退化区域总面积的 49.525%, 50.475%, 其中以气候变化主导的 NDVI 退化区域零星分布于哈尔滨市西部、佳木斯市东北部、双鸭山市北部等地;以人类活动主导的 NDVI 退化区域零星分布于牡丹江市东北部、大庆市西部、齐齐哈尔市西南部等地。总体来看,气候变化和人类活

动对 NDVI 变化的相对作用大小表现出明显的地域差异,呈相互交错的空间格局。气候变化在黑龙江省西部、西南部及西北部地区的植被改善中发挥关键作用,而人类活动是中部及南部地区植被恢复的主要成因,以气候变化、人类活动为主导导致植被退化的区域分布较为均衡(图 11)。

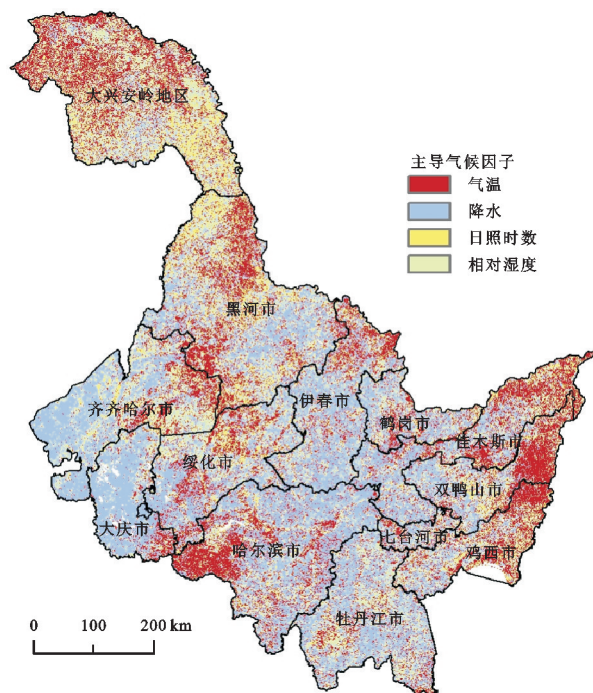


图 9 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 变化主导气候因子空间分布

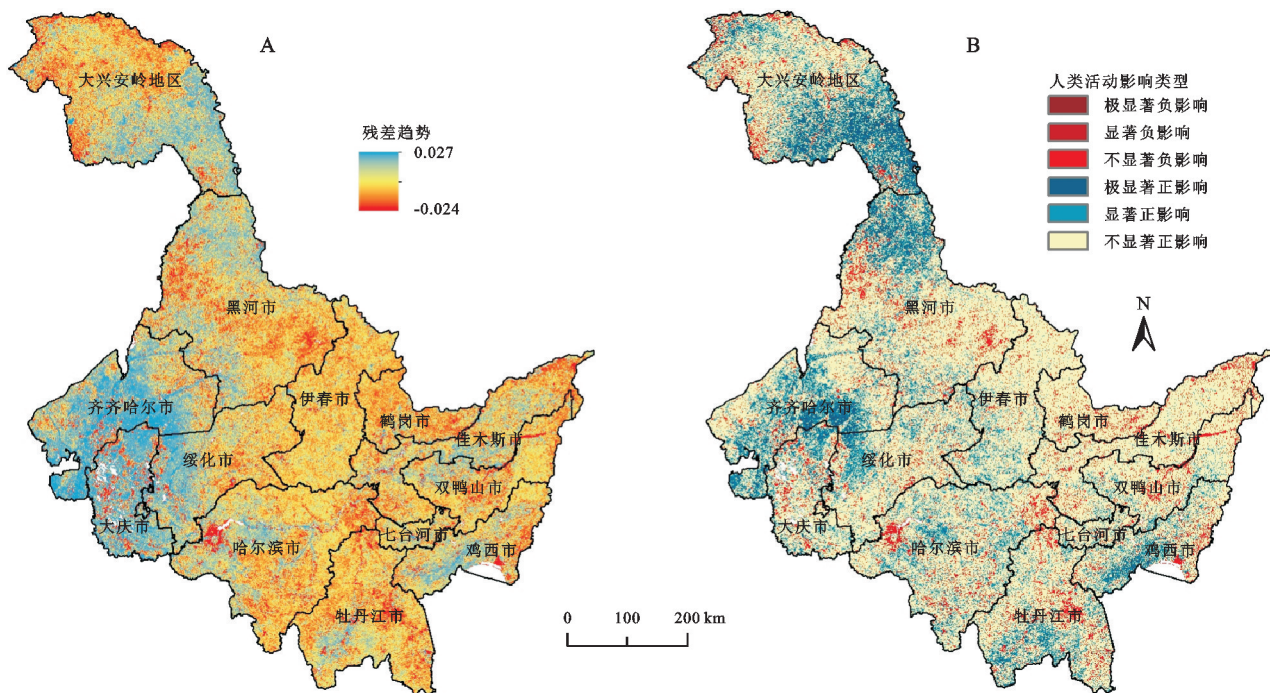


图 10 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 残差趋势(A)及人类活动对 NDVI 影响类型(B)空间分布

4 讨论

2000—2020 年黑龙江省植被覆盖整体水平较高,空间分异明显。海拔是影响 NDVI 空间分布的重要因

素,有研究表明^[37],不同海拔梯度下地表水热状况、人类活动的方式和强度不同,从而导致植被垂直分布存在差异。21 年间黑龙江省及各行政区划单元植被 NDVI 在时间上均呈增长态势,空间上均以改善趋势

为主且明显改善区域占比最大,与王亭月^[38]的研究结论一致。

黑龙江省 NDVI 未来变化趋势主旋律为持续改

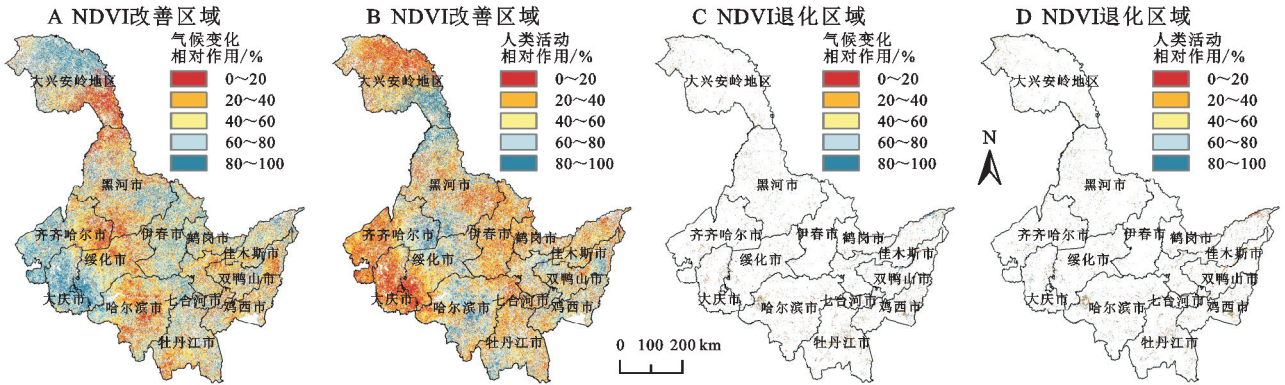


图 11 2000—2020 年黑龙江省气候变化(A—B)和人类活动(C—D)对 NDVI 变化的相对作用空间分布

2000—2020 年黑龙江省气温、降水和相对湿度总体呈上升趋势,速率分别为 0.360℃/10 a,120.314 mm/10 a,0.055%/10 a,日照时数总体呈下降趋势,速率为 0.061 h/10 a,气候环境总体趋向暖湿化,有利于植物生长。

NDVI 与各气候因子的偏相关性空间分布均存在正相关与负相关共存的现象,整体上 NDVI 对降

善,但持续改善能力较弱,与方利等^[39]的研究结果基本一致,局部 NDVI 持续退化地区仍存在较大的植被危机,需持续跟踪关注。

水的正向响应最为强烈,以降水为主导气候因子的区域范围最大,是黑龙江省 NDVI 变化的主要气候驱动力,在不同学者的相关研究^[40-41]中也证实了这一观点,但与田艳林^[42]的研究结论相悖,主要原因可能与研究时段不同有关,相关研究成果表明^[43],基于有限时间序列的相关分析,会由于起点、结束点及突变点的不同而产生不同结果(图 12)。

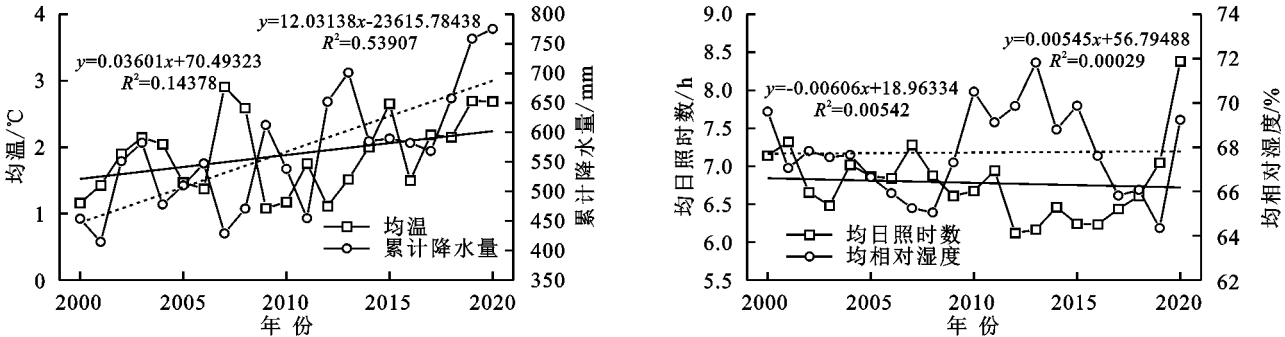


图 12 2000—2020 年黑龙江省各气候因子年际变化

土地利用变化是人类活动对自然改造过程的直接体现,筛选出占比>1%的主要土地利用转移类型,共 12 类,其中以林地与耕地间的相互转化居多,占比达到 7.111%。不同转移方向对 NDVI 变化的影响存在差异,由耕地转向林地、草地(面积 1.848 万 km²,占比 4.085%)代表一系列生态林业工程,其中 NDVI 改善区域占其总面积的 89.998%,但也应注意到这些区域仍存在植被退化现象,有学者研究认为^[44],大规模植树造林会加大土壤水分消耗,加剧干旱风险,对植物生长产生消极影响,因此对于植被建设与当地气候、水文等要素的协调仍需进一步探讨。2000—2020 年建设用地主要由耕地转入(面积 7 128 km²,占比 1.576%),未利用地主要由林地转入(面积 1.523 万 km²,占比 3.367%),主要是人类的社会经济活动所造成,其中 NDVI 退化区域占其总面积的 6.089%,高于研究区退化部分占整体比例,主要分布在

哈尔滨市西部、大庆市中部、齐齐哈尔市南部及大兴安岭地区,与 21 a 间 NDVI 退化区域以及残差趋势为负值的区域基本吻合,进一步佐证农牧交错带、森林草原过渡带及城市中心区的植被退化与人类活动的负面干扰密切相关,这与冒竹鹏等^[45]的研究结果一致。(图 13)。

基于残差分析的气候变化与人类活动相对作用分析法,克服了以往研究中人类活动的影响通常根据社会统计资料进行分析而难以实现空间差异表达与量化的局限。本研究将相对评价方法中的情景 4 视为误差,误差部分在 NDVI 改善与退化区域中占比极少,分别仅占其总面积的 0.036%,0.337%。产生误差的主要原因可能为部分地区植被结构复杂、生境相对破碎,数据重采样等处理使分类结果有失精度,后续需结合植被景观格局变化特点等方面对研究过程进一步细化。

本文仅采用了 MODIS NDVI 数据,未使用多源 NDVI 数据进行相互验证,气候因素方面选择了气温、降水、日照时数和相对湿度 4 类密切相关因子,忽略了太阳辐射、地表蒸散发、云覆盖比例等因素的影响,且本文将人类活动对植被变化的影响作为整体进行讨论,未量化生态建设、人口密度、城市分布等对植被生长的具体影响范围和作用强度。未来将加强多源数据融合和集成分析,加入多因素探讨并精细化考量黑龙江省植被动态变化及其驱动机制,以确保研究结果更加客观全面。

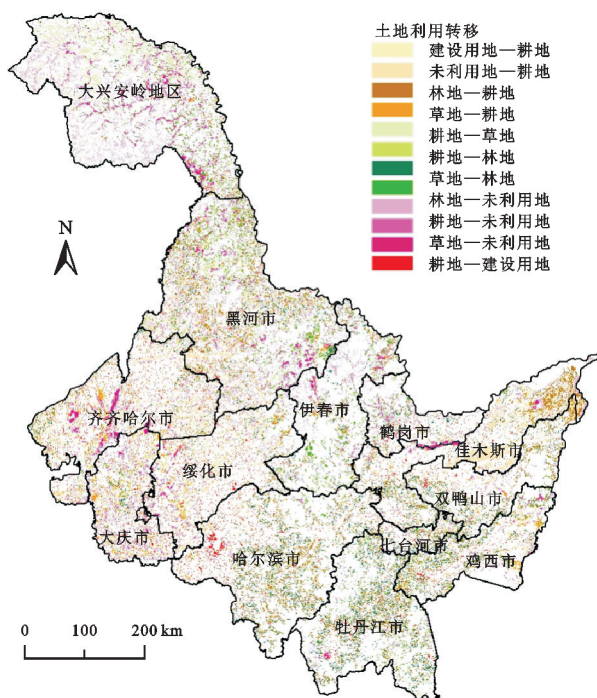


图 13 2000—2020 年黑龙江省主要土地利用转移类型

5 结论

(1) 时间尺度上,2000—2020 年黑龙江省及各行政区划单元 NDVI 均呈上升趋势,整体增长率为 $0.028/10\text{ a}$ ($p < 0.001$),其中大庆市上升趋势最为显著。空间尺度上,黑龙江省 NDVI 空间分布呈“西南低、中部和东南高”的格局且具有明显的垂直地带性,88.043% 的区域 NDVI 均值 > 0.8 ,植被覆盖状况整体较好。21 a 间黑龙江省 NDVI 改善区域面积远大于 NDVI 退化区域面积,分别占比 91.072%,3.381%。

(2) 未来趋势上,黑龙江省 NDVI 的 Hurst 指数 > 0.5 的像元数占比 88.222%,NDVI 变化整体趋向持续性,但以弱持续性为主。NDVI 未来变化趋势以持续改善为主,占比 82.367%,持续退化及由改善转为退化的区域占比 11.414%。

(3) 影响因素上,黑龙江省 NDVI 变化受气候变

化和人类活动的共同作用,NDVI 与气温、降水和相对湿度呈正相关关系,与日照时数呈负相关关系,且降水对 NDVI 的作用强于其他气候因子,以降水为主导气候因子的区域占比最高,为 50.043%。2000—2020 年人类活动对黑龙江省 NDVI 呈积极影响的区域占比 89.549%,整体上促进了黑龙江省植被生长。

(4) 气候变化和人类活动对 NDVI 变化的相对作用上,呈明显的空间异质性,其中气候变化是黑龙江省 NDVI 改善的主要因素,受气候变化主导的 NDVI 改善区域占比 56.495%,人类活动对黑龙江省 NDVI 退化的作用略高于气候变化,两者基本持平,以其为主导的 NDVI 退化区域分别占比 50.475%,49.525%。

参考文献:

- [1] Gao W, Zheng C, Liu X, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China[J]. Ecological Indicators, 2022,137:108745.
- [2] Gao X, Huang X X, Lo K, et al. Vegetation responses to climate change in the Qilian Mountain Nature Reserve, Northwest China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021,28:e01698.
- [3] 李茂华,都金康,李皖彤,等.1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J].地理科学,2020,40(5): 823-832.
- [4] Das P. 20 years MODIS-NDVI monitoring suggests that vegetation has increased significantly around Tehri Dam reservoir, Uttarakhand, India[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021,24:100610.
- [5] 周妍妍,朱敏翔,郭晓娟,等.疏勒河流域气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对影响评价[J].生态学报, 2019,39(14):5127-5137.
- [6] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].自然资源学报,2019,34(8): 1748-1758.
- [7] 杨旭超,张军,李杰,等.呈贡区近 30 年植被覆盖度时空变化特征与土地利用驱动[J].水土保持研究,2019,26(4):232-238.
- [8] Mao P P, Zhang J, Li M, et al. Spatial and temporal variations in fractional vegetation cover and its driving factors in the Hulun Lake region[J]. Ecological Indicators, 2022,135:108490.
- [9] 刘恒,汤弟伟,孙毅,等.武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021, 28(5):245-253.
- [10] 徐虹,刘琴.2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J].水土保持研究,2022,29(1):162-168.

- [11] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere(1982—2013) [J]. *Global and Planetary Change*, 2017,148:1-8.
- [12] Baniya B, Tang Q H, Pokhrel Y, et al. Vegetation dynamics and ecosystem service values changes at national and provincial scales in Nepal from 2000 to 2017[J]. *Environmental Development*, 2019,32. DOI:10.1016/j.envdev.2019.100464.
- [13] Verhoeven V B, Dedoussi I C. Annual satellite-based NDVI-derived land cover of Europe for 2001—2019[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,302:113917.
- [14] 孙天瑶,李雪梅,许民,等.2000—2018 年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J].*干旱区地理*,2020,43(2):415-424.
- [15] 孟琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响:以京津风沙源区为例[J].*中国环境科学*,2021,41(2):826-836.
- [16] 张家政,李崇贵,王涛.黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J].*水土保持研究*,2022,29(1):224-230,241.
- [17] Diao C, Liu Y, Zhao L, et al. Regional-scale vegetation-climate interactions on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Informatics*, 2021,65:101413.
- [18] 朱丽亚,胡克,孙爽.2000—2018 年辽河流域植被 NDVI 变化及其与温度、降水的响应关系[J].*生态科学*, 2022,41(3):203-213.
- [19] 聂桐,董国涛,蒋晓辉,等.延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J].*水土保持研究*,2021,28(5):340-346.
- [20] 钱琛,陈海滨,侯现慧.生态建设背景下陕西省植被覆盖时空变化及其影响因素研究[J].*干旱区地理*,2020, 43(2):425-433.
- [21] Qi X Z, Jia J H, Liu H Y, et al. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales[J]. *Catena*, 2019,180:224-237.
- [22] Chen T, Bao A, Jiapaer G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,653:1311-1325.
- [23] 刘延坤,王文帆,孙清芳,等.黑龙江省土地退化类型特征及其驱动力分析[J].*环境科学与管理*,2012,37(9): 63-66.
- [24] 黄楠,莫红,张国庆.基于 TM 数据的黑龙江省西部地区草场荒漠化变化趋势研究[J].*黑龙江农业科学*,2010 (9):169-171.
- [25] 王平,孙涛.黑龙江省黑土区水土流失动态及成因分析 [J].*水土保持通报*,2013,33(4):8-11.
- [26] 焦燕,胡海清.黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化 [J].*应用生态学报*,2005,16(12):2248-2252.
- [27] 刘文彬,蔡体久,琚存勇,等.1981—2003 年黑龙江省植被变化及其对气候的响应[J].*林业科学*,2010,46(6): 154-160.
- [28] 张晓慧.黑龙江省植被变化特征及其与气候的响应 [D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2015.
- [29] 赵梦溪.基于 Google Earth Engine 的黑龙江省植被覆盖时空变化分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [30] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968,63(324):1379-1389.
- [31] 彭凯锋,蒋卫国,侯鹏,等.三江源国家公园植被时空变化及其影响因子[J].*生态学杂志*,2020,39(10):3388-3396.
- [32] 曹亚楠,孙明翔,陈梦冉,等.2000—2016 年藏北高原降水对植被覆盖的影响[J].*草地学报*,2022,30(3):721-730.
- [33] 徐勇,黄雯婷,卢梦缘,等.气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化相对作用[J].*水土保持研究*,2022,29(3):292-299.
- [34] 许端阳,康相武,刘志丽,等.气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究[J].*中国科学(D 辑:地球科学)*,2009,39(4):516-528.
- [35] 李蓉,辛景峰,杨永民.1949—2017 年东北地区旱灾时空规律分析[J].*水利水电技术*,2019,50(S2):1-6.
- [36] 于成龙,刘丹,马秋斯,等.1961—2013 年黑龙江省气温变化特征[J].*环境科学与技术*,2016,39(5):169-175.
- [37] Fan J Q, Xu Y, Ge H Y, et al. Vegetation growth variation in relation to topography in Horqin Sandy Land[J]. *Ecological Indicators*, 2020,113:106215.
- [38] 王亭月.2012—2018 年黑龙江省植被覆盖度动态变化分析[J].*国土与自然资源研究*,2020(4):16-21.
- [39] 方利,王文杰,蒋卫国,等.2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J].*地理科学*,2017,37(11):1745-1754.
- [40] 张佳琦,张勃,马彬,等.三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].*中国沙漠*,2019,39(3):206-213.
- [41] 高永刚,温秀卿,顾红,等.黑龙江省气候变化趋势对自然植被第一性净生产力的影响[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2007,35(6):171-178.
- [42] 田艳林.黑龙江流域植被物候对气候变化响应的多尺度研究[D].长春:中国科学院大学:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2020.
- [43] Wessels K J, Van Den Bergh F, Scholes R J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,125:10-22.
- [44] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,209: 87-99.
- [45] 冒许鹏,刁娇娇,范佳辉,等.内蒙古大兴安岭林草交错带景观动态分析[J].*生态学报*,2021,41(21):8623-8634.