doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 01. 010

2000—2020 年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应

刘智源,李继红*
(东北林业大学 林学院,森林生态系统可持续经营教育部重点实验室,哈尔滨 150040)

摘　要:以 2000—2020 年黑龙江省的 MODIS NDVI 数据、土地利用数据和气象数据作为研究对象,提取出耕地、林地和草地 3 种主要土地覆盖类型的气温、降水 2 个气候因子,探究黑龙江省植被覆盖指数(NDVI)近 21 a 的时空变化和植被变化与气候因子的关系。采用 Theil-Sen(泰尔-森)趋势估算和 Mann-Kendall(曼-肯德尔)趋势检验、变异系数、Hurst(赫斯特)指数和相关分析等方法,对黑龙江省 2000—2020 年不同季节、不同植被类型 NDVI 的时空变化特征及 NDVI 与温度、降水量的关系进行分析。结果表明,1)近 21 a 黑龙江省生长季年均 NDVI 为 0. 91,高植被覆盖区域主要分布于黑龙江省的中部及南部,NDVI 的年内波动变化存在明显的季节特征。2)全省 NDVI 较为稳定,草地 NDVI 稳定性最高。3)近 21 a 黑龙江省 NDVI 整体呈显著上升趋势,速度为每 10 a 增加 4. 7%,其中呈显著增加趋势的区域占全省面积的 35. 55%(P<0. 05),这些区域主要分布在黑龙江省中部、西部和北部。4)未来黑龙江省 NDVI 整体变化趋势以同向持续变化为主(69. 5%),发展趋势可能向退化的恶性方向发展占 35. 33%,可能向改善的良性方向发展占 43. 6%。5)黑龙江省的植被和各季节与降水和温度均呈正相关(P<0. 05)。由此得到,近 21 a 黑龙江省植被整体覆盖水平良好,且呈改善趋势。未来植被覆盖变化向良性改善方向的发展趋势为主,气温和降水均对植被变化呈正相关影响。

关键词:黑龙江省;NDVI;气候因子;时空变化 ;偏相关系数
中图分类号:Q948　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)01-0085-13

Responses of Temporal and Spatial Changes of Vegetation to Climate Factors in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

LIU Zhiyuan, LI Jihong*
(College of Forestry, Northeast Forestry University, Key Laboratory of Sustainable Management of Forest Ecosystem, Ministry of Education, Harbin 150040, China)

Abstract: Taking the MODIS NDVI data, land use data and meteorological data of Heilongjiang Province from 2000 to 2020 as the research object, three main types of land cover, farmland, forest land and grassland, and two climate factors, temperature and precipitation, were extracted to explore the spatial and temporal changes of the vegetation cover index (NDVI) in Heilongjiang Province in the past 21 years and the relationship between vegetation changes and climate factors. Using Theil-Sen and Mann-Kendall trend tests, coefficient of variation, Hurst index, and correlation analysis methods, Using Theil Sen trend estimation, Mann Kendall trend test, coefficient of variation, Hurst index, and correlation analysis methods, this study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of NDVI in different seasons and vegetation types in Heilongjiang Province from 2000 to 2020, as well as the relationship between NDVI and temperature and precipitation. The results indicated that, 1) in the past 21 years, the average annual NDVI of the growth season in Heilongjiang Province had been 0. 91, and the high vegetation coverage area was mainly distributed in the central and southern parts of Heilongjiang Province. There were obvious seasonal characteristics of NDVI fluctuations within the year. 2) The NDVI in the province was relatively stable, with the highest stability in grassland NDVI. 3) In the past 21 years, the overall NDVI in Heilongjiang Province had shown a significant upward trend, with a rate of 4. 7% increase every 10 years. The regions showing a significant increasing trend accounted for 35. 55% of the province's area (P<0. 05), mainly distributed in the central, western, and northern parts of Heilongjiang Province. 4) In the future, the overall trend of NDVI in Heilongjiang Province will mainly be continuous changes in the same direction (69. 5%), with 35. 33% likely to develop towards a malignant direction of degradation and 43. 6% likely to develop towards a benign direction of improvement. 5) The vegetation and seasons in Heilongjiang Province were positively correlated with precipitation and temperature (P<0. 05). As a result, the overall vegetation coverage level in Heilongjiang Province has been good in the past 21 years and shows an improvement trend. The development trend of future vegetation cover changes is mainly towards benign improvement, and temperature and precipitation have a positive correlation with vegetation change.

Keywords: Heilongjiang Province; NDVI; climatic factors; spatio-temporal variation; partial correlation coefficient

---

审图号: 黑 S(2023)143 号

注: 加格达奇区、松岭区和抚远三角洲暂无资料。

收稿日期: 2022-11-18
基金项目:国家自然科学基金项目(32071838)。

第一作者简介:刘智源,硕士研究生。研究方向为 3S 技术与林业遥感。E-mail: 1029485772@ qq. com
*通信作者:李继红,博士,教授。研究方向为地理信息科学。E-mail: jihlee@ nefu. edu. cn

引文格式:刘智源,李继红. 2000—2020 年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应[J]. 森林工程,2024,40(1):85-97.
LIU Z Y, LI J H. Responses of temporal and spatial changes of vegetation to climate factors in Heilongjiang Province from 2000 to 2020[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):85-97.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引言

植被是陆地生态系统的主体,在土壤形成、气候调节和生态系统稳定方面发挥着关键作用[1-2]。植被生长和气候变化两者存在交互影响,植被会因为气候变化影响其生长,同时气候也会因为植被的生长得到反馈,在面对气候变化中植被的生长状态能产生相应的指示[3-5]。而且,植被覆盖和气候变化都会受到人类活动的影响,能反映出区域生态系统的质量[6-7]。近年来,植被与气候之间的动态关系受到许多因素的影响,生态系统受到破坏后需要长时间去恢复,而严重的全球气候变化和过度的人类活动可能是生态系统破坏的原因之一[8]。植被的生长和动态变化已经引起了广泛学者的关注,对地表植被及其覆盖变化的研究已经成为全球科学研究的重要组成部分[9-11]。

随着卫星遥感技术的不断进步和成熟,利用遥感数据监测植被生长状况和植被覆盖变化是目前流行且高效的方法,植被指数是研究上述2种课题的最有意义方法之一[12-13]。在目前的研究成果中,众多植被指数被广泛应用于植被覆盖变化的研究[14]。其中,John 等[15]将归一化植被指数(NDVI)带进大众视野,在对大尺度的植被生长状况和植被覆盖变化的研究时表现良好,也是评价区域生态好坏的一个重要标准。与此同时 NDVI 遥感数据集也在不断扩充,Landsat TM、GIMMS、SPOT-VGT 和 MODIS 逐渐加入植被变化研究中,且作为不同尺度植被覆盖研究下主要的数据来源[16-19],特别是 MODIS 数据,因其相对于其他数据在时空分辨率和光谱分辨率中有较大优势,从2000年至今被广泛地应用于区域甚至全球的大尺度植被变化研究和生态环境的监测[20-21]。近些年来,植被变化的研究仍然是一个热点问题,基于长时序的 NDVI 数据,国内外许多学者研究了世界各地不同时空尺度上的植被变化;李雨鸿等[11]使用 MODIS-NDVI 数据集,通过使用像元二分模型估算辽宁省的植被覆盖情况,结果显示近19 a来全省有92.3%面积的植被覆盖度在增加;Meng 等[22]对内蒙古地区植被变化研究发现,干旱地区的荒漠草原和戈壁沙漠都已显著退化,而草甸草原和高寒草原呈显著上升趋势;穆少杰等[24]对内蒙古地区影响植被生长的因子研究发现,植被生长相比起单因子的影响更加依赖于水热组合的作用,且草原植被覆盖度对降水量的响应存在时滞效应;易扬等[25]的研究发现,长江中游地区的植被 NDVI 动态变化趋势存在绝大部分区域是不确定性发展,且城市群周边植被 NDVI 呈持续退化趋势;Gholamnia 等[23]在伊朗库尔德斯坦省植被覆盖的研究中发现,当地植物对一个月前的降水量与该地区的最大 NDVI 有较高的相关性。这些研究表明,植被活动变化在全球范围内增强,在北半球的中高纬度增强结果显著。

由于人类活动、极端气候和自然灾害等因素的影响,导致耕地、草地面积减少。但近年来得到了政府政策的保障,生态用地是目前我国重点保护与恢复的土地类型。所以,在世界气候变化与生态环境保护的大背景下,深入研究黑龙江地区植被覆盖的差异性时空变化趋势具有重要意义。本研究通过利用 MODIS NDVI 的时间序列数据集、土地利用统计数据和气象统计数据,对黑龙江地区近21 a间植物 NDVI 的空间变化趋势特点以及趋势规律做出了解析。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

黑龙江省是中国最东北端的省份,位于43°26′~53°33′N, 121°11′~135°05′E,总面积4.73×10^5 km^2,北部接壤俄罗斯,东边为日本海,西侧和南侧毗邻内蒙古和吉林省。黑龙江省也是中国最大的林业省份之一,长白山脉、完达山脉以及大小兴安岭等山区包含了省内绝大多数的天然林资源。全省年平均气温在-4~5 ℃,平均降水量大于500 mm,四季分明,属寒温带和温带大陆性季风气候,从南到北是中温和寒温带,且具有明显的季风性特征。夏季易受东南季风的影响,降水量大;冬季易受到西北风影响,降水不足且空气干燥[26-27]。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 MODIS 数据

本研究利用 GEE(Google Earth Engine)平台下载2000—2020年 MODIS NDVI(MOD3Q1)产品,数据时间分辨率为16 d,空间分辨率为250 m。由于数据在2001年和2002年中几个月存在部分缺失,使用地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/search)对缺失数据进行补充下载。首先利用 ArcGIS 对这部分数据进行裁剪,然后利用最大值合成法(Maximum Value Composites,MVC)逐月合成 NDVI 数据,得到研究区2000—2020年逐月 NDVI 时间

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

序列数据集。

1.2.2　气象数据和土地覆盖数据

本研究中使用的气象数据来自国家基础科学技术平台-国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)2000—2020 年的中国区域逐月降水量数据集和中国区域逐月近地表平均气温数据集[28-29],空间分辨率为 1 km。分别将气象数据与对应的时间段(春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12 月至翌年 2 月))的 NDVI 进行叠加分析。土地覆盖数据来源于武汉大学中国 LCA 基础数据库(CLCD)数据集,空间分辨率为 30 m[30]。将气象数据和土地利用数据重采样为 250 m 空间分辨率。

2　研究方法

2.1　Theil-Sen 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验

首先采用 Theil-Sen(泰尔-森)趋势估算方法计算黑龙江省 NDVI 的变化趋势,然后结合 Mann-Kendall(曼-肯德尔)检验判断其趋势的显著性。Theil-Sen 趋势分析法是一种非参数统计趋势分析方法。其优点是样本对离群值和测量误差趋势分析的影响不敏感,适用于时间序列 NDVI 的趋势分析[16]。计算公式如下

$$\beta = \text{Median}\frac{x_m - x_n}{m - n}。\tag{1}$$

式中:β 为判断 NDVI 变化趋势的斜率;Median 为中位数函数;m、n 为时间序数;x_m、x_n 分别代表第 m 和第 n 年 NDVI 的值。

当 $\beta>0$ 时,表明 NDVI 在此时间范围内呈上升趋势;当 $\beta=0$ 时,表明 NDVI 在此时间范围内维持不变;当 $\beta<0$ 时,表明 NDVI 在此时间范围内呈下降趋势。根据 β 的取值情况,变化趋势被划分为 3 个区间:$\beta>0.001$ 为增加、$-0.001<\beta<0.001$ 为基本不变、$\beta<0.001$ 为减少。

Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验方法,属于非参数检验。其优点是测试样本不需要满足某些分布规则,离群值和异常值不会干扰检验结果。计算 Theil-Sen 趋势后用这种方法对变化趋势进行检验[25]。当显著性水平为 α 时,若正态分布统计量 $|Z_C|$ 满足 $|Z_C| > Z_{1-\alpha/2}$,则说明时间序列在此显著水平下,显著性存在统计学意义。当统计量满足 $|Z_C|\geqslant 1.28$ 时,通过置信度为 90% 显著性检验;当统计量满足 $|Z_C|\geqslant 1.64$ 时,通过置信度为 95% 显著性检验,显著性区间划分见表 1。

表 1　Mann-Kendall 检验方法显著性统计

Tab. 1 Mann-Kendall test method significance statistics

显著性检验 Significance test	Z_C 范围 Range of Z_C value	变化趋势 Change trend
$\|Z_C\|\geqslant 1.64$	<-1.64	显著减少
	>1.64	显著增加
$1.64\geqslant\|Z_C\|\geqslant 1.28$	$-1.64\sim-1.28$	减少不显著
	$1.28\sim1.64$	增加不显著
$\|Z_C\|\leqslant 1.28$	$-1.28\sim1.28$	基本不变

2.2　Hurst(赫斯特)指数

Hurst 指数是基于长时序非函数周期的 R/S(Rescaled range analysis)的分析方法,可以描述 NDVI 持续性或反持续性的变化,本研究采取 R/S 分析法计算 Hurst 指数判断黑龙江省植被 NDVI(式中记为 N_{DVI})演变趋势的预测[31-33]。原理如下。

时间序列 (t),$t=1,2,\cdots\cdots$,这里 $N_{\text{DVI}}(t)=B(t)-B(t-1)$,$B(t)$ 为时刻 t 的观测值,对于任意大于等于 1 的正整数 τ,定义其均值序列为

$$N_{\text{DVI}\tau}=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}N_{\text{DVI}}(t),\tau=1,2,\cdots\cdots。\tag{2}$$

累计离差序列 $X(t,\tau)$

$$X(t,\tau)=\sum_{t=1}^{\tau}(\xi(t)-\xi_\tau),1\leqslant t\leqslant\tau。\tag{3}$$

极差序列 $R(\tau)$

$$R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau),\tau=1,2,\cdots\cdots。\tag{4}$$

标准差序列 $S(\tau)$

$$S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t-1}^{\tau}(N_{\text{DVI}}(t)-N_{\text{DVI}\tau})^2\right]^{\frac{1}{2}},\tau=1,2,\cdots\cdots。\tag{5}$$

式中:$R(\tau)/S(\tau)\cong R/S$,若关系 $R/S\propto\tau H$ 成立,则意味着时间序列 $N_{\text{DVI}}(t)$,$t=1,2,\cdots\cdots$,Hurst 现象存在,Hurst 指数用 H 表示,取值范围 0~1。当 $0<H<0.5$ 时,表明未来 N_{DVI} 变化趋势是反持续的。当 $0.5<H<1$ 时,表明未来 N_{DVI} 变化趋势与过去相同。当 H 为 0.5 时,表明 N_{DVI} 时间序列的未来趋势与过去趋势之间没有相关性[25]。

2.3　基于像元的植被 NDVI 变异系数计算

通过计算变异系数(C_v)可以观察植被覆被在时序上的波动情况,并且能很好地表现出 NDVI 数

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

据在时间序列上变化的离散程度以及均值水平，通常用于数据稳定性评价[34]，计算公式如下

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(N_{DVIi} - \overline{N_{DVI}^2})}}{\overline{N_{DVI}}}。\quad (6)$$

2.4 基于像元的偏相关分析

在描述植被 NDVI 和气温、降水的关系时，为了控制变量间的影响，在对气温和降水二者之一和 NDVI 的关系分析时需控制另一个变量。采用偏相关分析方法来客观描述 NDVI 和降水、温度的关系[25]，计算按公式如下

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}。\quad (7)$$

$$r_{ijh} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}}。\quad (8)$$

式中：y_i 是第 i 年平均气温、降水；$\bar{y}$ 是气温、降水多年平均值；x_i 是第 i 年 NDVI 平均值；$\bar{x}$ 是 NDVI 多年平均值；r_{ij} 是变量温度和降水的简单相关系数；r_{ih} 是温度与 NDVI 的简单相关系数；r_{jh} 是降水和 NDVI 的简单相关系数。

3 结果与分析

3.1 黑龙江省 NDVI 空间分布特征

黑龙江省植被生长季在每年的 4—10 月，采用最大值合成法合成 2000—2020 年黑龙江省生长季逐月的 NDVI 值，如图 1 所示。由图 1 可知，黑龙江全省在生长季时平均 NDVI 为 0.91，有 92.5% 面积的高植被覆盖度区域（NDVI>0.85），遍布黑龙江全省，NDVI>0.95 的极高植被覆盖区域主要分布于黑龙江省的中部和南部；6.8% 面积的中植被覆盖度区域（0.5<NDVI<0.85），分布区域从南向北纵穿整个黑龙江省；0.7% 的低植被覆盖度区域（NDVI<0.5），主要分布于黑龙江省的西侧。

3.2 黑龙江省 NDVI 时空变化特征

利用 2020 年黑龙江省月均值 NDVI 数据对 NDVI 年内变化进行分析，黑龙江省 2020 年内月均 NDVI 伴随年内气温和降水的变化存在明显变化的特征。年内 NDVI 值为 0.11~0.85，NDVI 最大值和年内 NDVI 最小值分别出现于 7 月和 2 月，如图 2 所示。

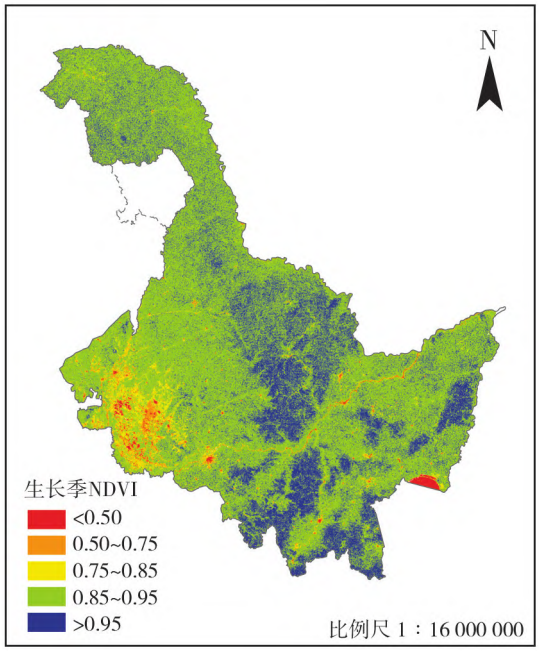


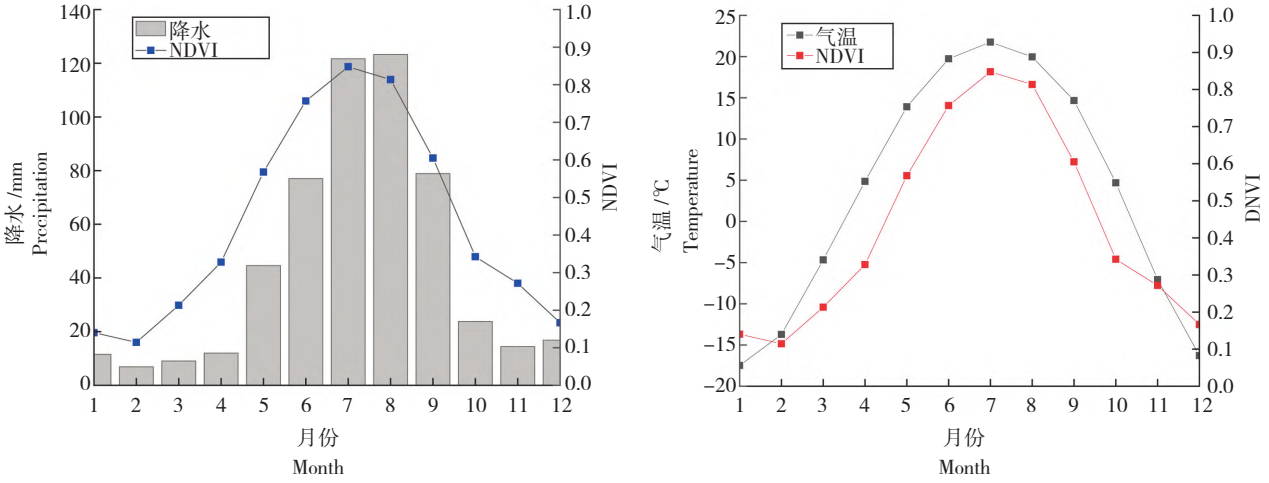
图 1 2020 年黑龙江省生长季 NDVI 空间分布图

Fig. 1 NDVI spatial distribution map of growth season in Heilongjiang Province in 2020

由图 2 可知，2—7 月是降水、气温上升时间段，该时间段内 NDVI 值也在逐月增加，7 月至次年 1 月是降水、气温下降的时间段，该时间段内 NDVI 值也在逐月下降。7 月达到了年内气温和降水的峰值，同时 NDVI 也处于年内最大值；2 月是年内降水最少月份，气温也处于零下，NDVI 此时为年内最小值。其中 NDVI 变化在 5 月增长幅度最大（23.97%），10 月下降幅度最大（-26.29%）。

2000—2020 年黑龙江省 NDVI 存在显著上升的变化趋势，速度为每 10 a 增加 4.7%（$P<0.05$），如图 3 所示。其中，2019 年达到了 NDVI 年平均值的最大值（0.47），分别在 2001 和 2004 年达到最小值（0.41）。2000—2020 年，有 12 a NDVI 变化趋势为上升，8 a NDVI 变化趋势为下降，其中 2012 年增长速率最大（6.43%），2004 年减少速率最大（9.47%）。基于 2000—2020 年的黑龙江省土地覆盖数据，从林地、耕地、草地中提取并分别计算其 NDVI 的平均值，并进一步讨论了黑龙江省不同植被类型的 NDVI 变化趋势。结果表明，3 种植被类型的 NDVI 与全省 NDVI 变化趋势相似。3 种植覆盖类型在年间呈显著增加趋势（$P<0.05$），增长率由大到小为：林地、草地、耕地。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

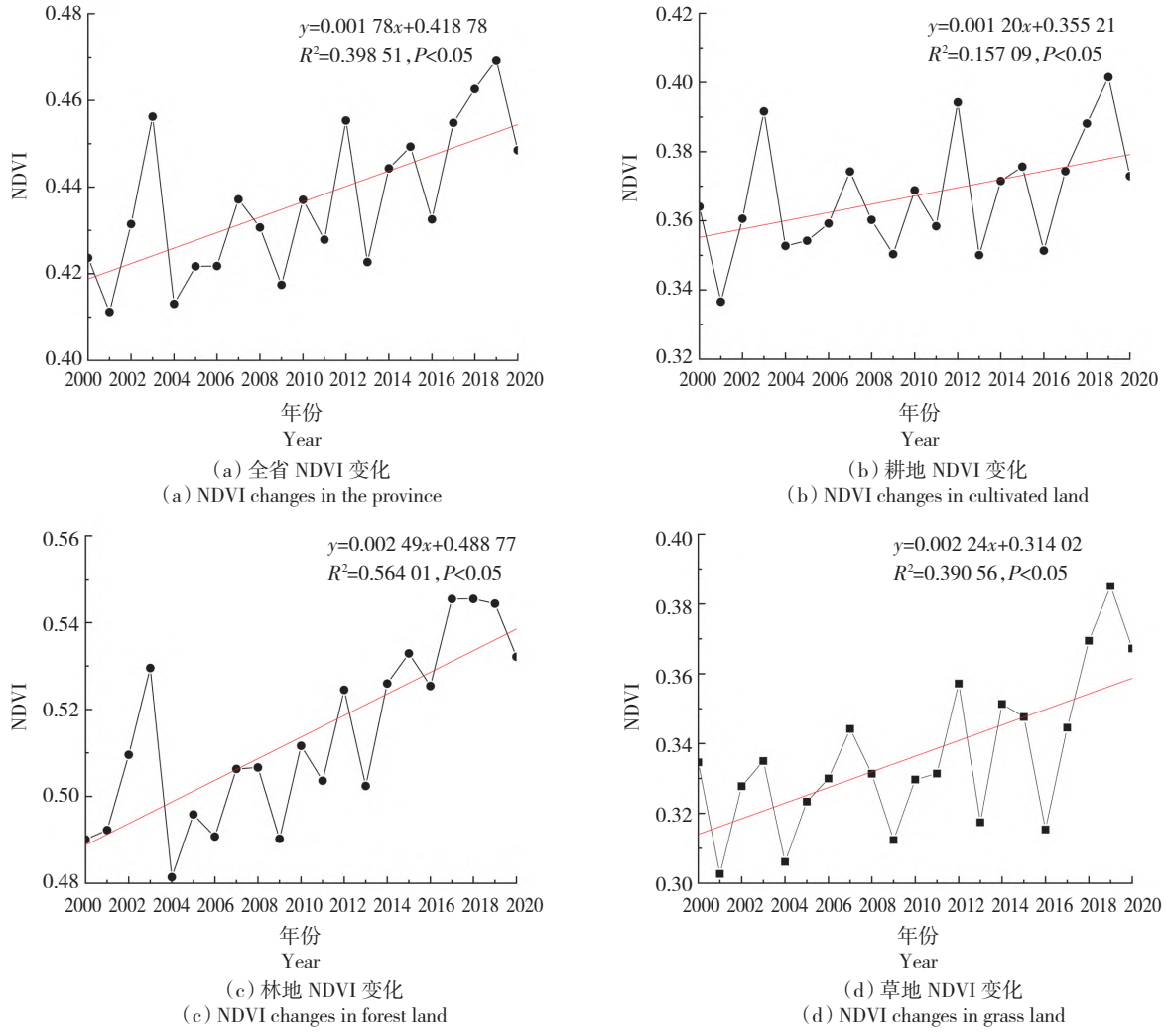


（a）降水和 NDVI 年内变化
（a）Precipitation and NDVI intra year changes

（b）气温和 NDVI 年内变化
（b）Temperature and NDVI intra year changes

图 2　2020 年黑龙江省月 NDVI、降水、气温的变化

Fig. 2 Changes of monthly NDVI, precipitation and temperature in Heilongjiang Province in 2020



（a）全省 NDVI 变化
（a）NDVI changes in the province

（b）耕地 NDVI 变化
（b）NDVI changes in cultivated land

（c）林地 NDVI 变化
（c）NDVI changes in forest land

（d）草地 NDVI 变化
（d）NDVI changes in grass land

图 3　不同类型植被覆盖及全省 NDVI 年度变化

Fig. 3 Annual changes of different types of vegetation cover and the whole province

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 黑龙江省不同植被覆盖类型稳定性的空间分布

变异系数可以描述 NDVI 多年的稳定性，变异系数在 0~0.15 内为弱变异，在 0~0.3 内为中等变异，在大于 0.3 的范围内为强变异。黑龙江省植被变异系数如图 4 所示，全省的变异系数范围为 0~1.3，平均变异系数为 0.081。其中 NDVI 弱变异的区域占全省面积的 97.34%，中等变异的区域占全省面积的 2.33%，强变异的区域占全省面积的 0.33%。呈现从北到南趋于稳定的态势，总体状态相对稳定。变异明显的中、强变异区域主要集中在黑龙江省西部和松花江两岸。

对不同植被覆盖类型 NDVI 进行变异系数的计算和统计，见表 2，草地、林地和耕地的植被覆盖均整体处于较为稳定的状态，变异系数均值由大到小分别为：耕地（0.038 0）、林地（0.036 0）、草地（0.002 1）。可以看出草地的植被覆盖稳定性最低，耕地的植被覆盖稳定性最高。

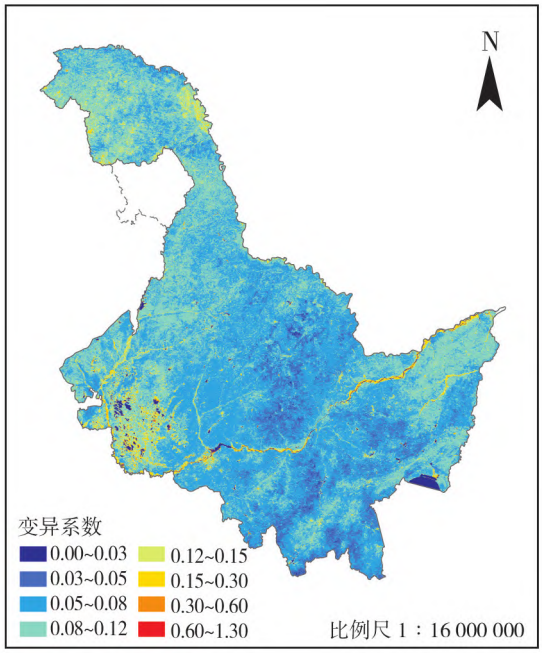


图 4 2000—2020 年黑龙江省 NDVI 变异系数

Fig. 4 Variation coefficient of NDVI in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

表 2 不同类型植被覆盖的变异系数统计

Tab. 2 Variation coefficient statistics of different types of vegetation cover

变异系数 CV	统计值 Statistical value			弱变异(%) Weak variation	中等变异(%) Moderate variation	强变异(%) Strong variation
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean			
耕地 Crop land	0	1.22	0.038 0	98.86	1.05	0.000 9
林地 Forest	0	1.02	0.036 0	99.67	0.30	0.000 3
草地 Grassland	0	0.79	0.002 1	99.73	0.26	0.000 1

3.4 黑龙江省各年度和季节 NDVI 变化趋势与显著性检验

为了研究黑龙江省 NDVI 的变化趋势，在逐像元的基础上计算了 Theil-Sen 趋势，并获得了黑龙江省 NDVI 变化率（β）的空间分布图和 Mann-Kendall 检验统计量（Z_C）的空间分布如图 5 所示。由图 5 可知，黑龙江省年 NDVI 的变化率为-0.03~0.02，全省植被年际变化增加显著的区域占全省总面积的 35.55%（$P<0.05$），植被退化的区域占全省面积的 10%（$P<0.05$）且分布不均匀。从分布上看，黑龙江省中部、西部和北部植被增加明显。对 β 进行显著性检验，可以发现减少和显著减少的区域集中在城市和河流沿岸的地区，呈点状线状围出的多边形，这样的分布特征与土地利用类型的空间位置有较大的重合。

由表 3 可知，黑龙江省 2000—2020 年在春季、夏季、秋季、冬季的平均 β 均为正，各季节的植被覆盖度均呈上升趋势。夏季的植被覆盖增速最快，达到了每 10 a 增长 0.003 1。不同季节植被覆盖的变化范围具有差异性，显著性也有所区别。气候对植被覆盖的影响可以在一定程度上通过不同季节的植被覆盖的变化幅度进行反映。在一年 4 个季节中仅有夏季的 Z_C 通过了 $P=0.05$ 的检验，在 2000—2020 年夏季的植被覆盖是有显著增加的，说明研究区域内夏季的植物生长对气候变化收到了正反馈效应。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

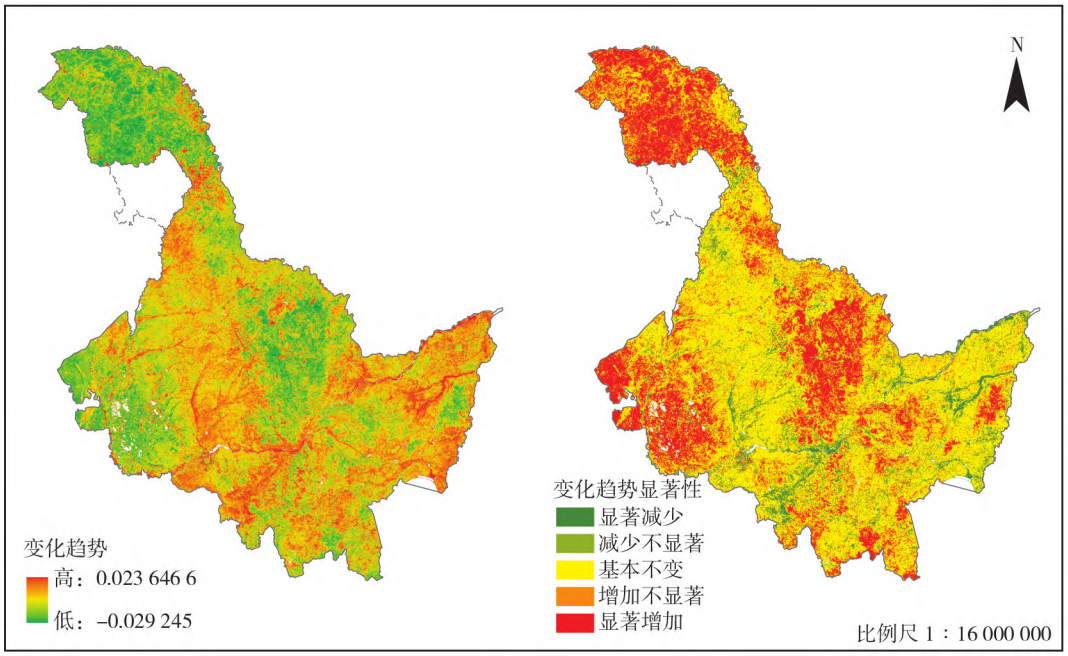


图 5　2000—2020 年黑龙江省 NDVI 变化趋势及变化趋势显著性

Fig. 5 Change trend and significance of NDVI in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

表 3　不同季节 NDVI 变化趋势和显著性

Tab. 3 Variation trend and significance of NDVI in different seasons

季节 Season	变化趋势 Trend of change		Z_C	趋势 Trend
	β	均值 Mean		
春季(3—5 月) Spring (March to May)	-0.027~0.026	0.002 1	1.14	基本不变
夏季(6—8 月) Summer (June to August)	-0.043~0.043	0.003 1	2.24	显著增加
秋季(9—11 月) Autumn (September to November)	-0.027~0.026	0.002 0	1.09	基本不变
冬(12 月至翌年 2 月) Winter (December to February next year)	-0.033~0.038	0.002 0	0.31	基本不变

3.5　黑龙江省不同植被类型 Hurst 指数与未来变化趋势

为更好了解黑龙江省 NDVI 的未来变化趋势的持续性,通过逐像元计算黑龙江省 NDVI 的 Hurst 指数,并结合通过显著性检验的 Sen 趋势变化结果,得出黑龙江省植被覆盖状况未来变化方向和过去变化趋势的关系,如图 6 所示。黑龙江省 Hurst 指数介于 0.141~0.987,其均值为 0.539,全省有 30.5% 面积 NDVI 的 Hurst 指数小于 0.5,有 69.5% 面积 NDVI 的 Hurst 指数大于 0.5,结果表明,黑龙江省植被总体变化具有同向持续发展的特征。Hurst 指数越接近 0.5,未来变化的持续性与过去趋势之间的相关性就越小。因此,根据持续性的方向和强度,Hurst 指数可以分为以下 4 类:强反向持续性($0<H<0.35$)、弱反向持续性($0.35<H<0.50$)、弱同向持续性($0.50<H<0.65$)、强同向持续性($0.65<H<1$)。将可持续性指数(H)和 NDVI 空间的变化趋势叠加后得出 NDVI 未来发展方向及强度,见表 4。

由图 6 和表 4 可知,未来黑龙江省整体发展态势可能向良性方向发展(良性方向占 56.52%),其中持续改善的区域占 37.88%(弱持续性改善和强持续性改善分别占 33.6% 和 4.28%),过去退化但未来变为改善趋势的区域占 6.72%(反强持续性退化和反弱持续性退化分别占 0.29% 和 6.43%);持续退化的区域占 16.68%(强持续性退化占 2.08%,弱持续性退化占 14.60%)过去有所改善,但未来会退化的区域占 18.65%(反强持续性改善占 1.13%,反弱持续性改善占 17.52%)。黑龙江省 NDVI 持续

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

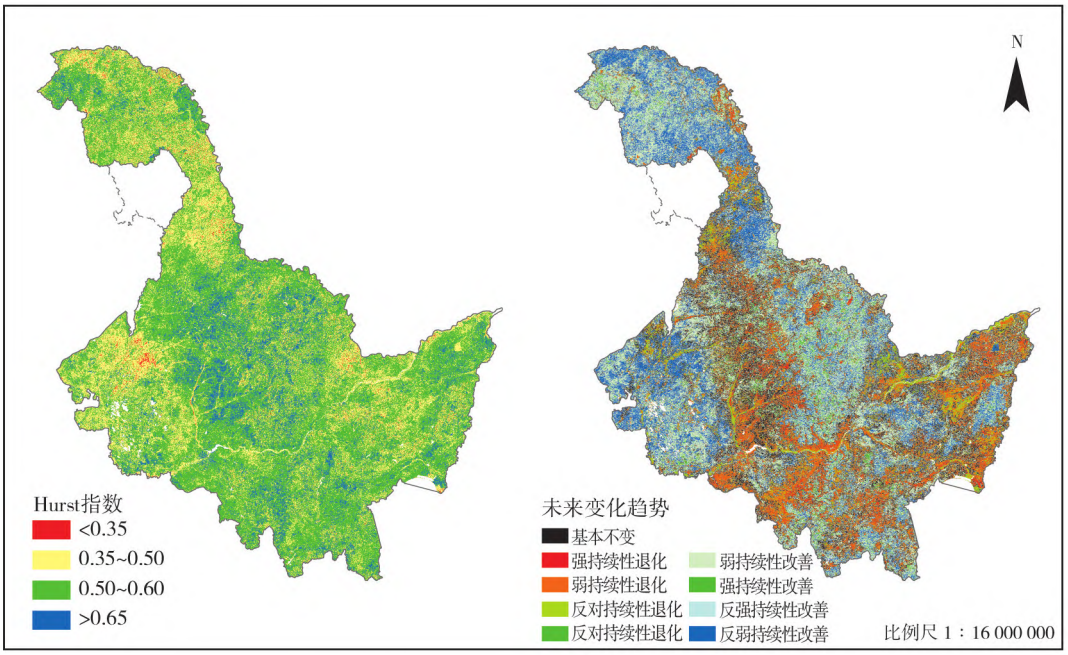


图 6 黑龙江省植被 NDVI 的 Hurst 指数及未来变化趋势

Fig. 6 Hurst index of vegetation NDVI and future trend in Heilongjiang Province

表 4 黑龙江省植被 NDVI 未来变化趋势

Tab. 4 Future change trend of vegetation NDVI in Heilongjiang Province

发展方向 Change directions	未来变化趋势 Future change trend	百分比(%) Percentage
持续退化 Continuous degradation	强持续性退化	2.08
	弱持续性退化	14.60
过去改善但未来是退化趋势 The past has improved, but the future is a degradation trend	反强持续性改善	1.13
	反弱持续性改善	17.52
过去退化但未来是改善趋势 Degradation in the past but improvement in the future	反弱持续性退化	6.43
	反强持续性退化	0.29
持续改善 Continuous improvement	弱持续性改善	33.60
	强持续性改善	4.28
基本不变 Basically unchanged	基本不变	20.08

改善地区主要分布在中西部及北部,西部持续改善的植被覆盖类型为草地,中部则为耕地。说明黑龙江省草原和农作物的植被覆盖受到较好的保护,在未来会持续增加。持续退化的区域分布不均,聚集在城市和河流附近,这表明人类活动对植被覆盖造成不好影响,但是预测强持续退化区域的面积不大,主要分布于城市中,说明人类活动受到管控良好,并未影响到森林、草地等自然生态区域。过去退化但未来是改善趋势的区域分布没有明显空间规律,主要存在于河流两侧和以点围绕的城市边缘,说明人类限制了城市扩张活动和对生态红区的保护及重建,在未来将可能增加城市周边和河流两岸的植被覆盖。过去改善但未来变为退化趋势的区域分布主要位于黑龙江省的西侧和最北侧,黑龙江省西侧为松嫩平原,松嫩平原是黑龙江省主要的粮食产出地,同时也有较为严重的土壤退化问题;北侧处于寒温带,植被覆盖以天然林为主。人类活动对这一地区的影响是有限的,因此这种变化的原因可能是气候因素的变化,而气候因素的改变可能是由人类活动间接产生的。

3.5 黑龙江省不同季节植被 NDVI 变化与降水、气温的关系

为探究黑龙江省 NDVI 变化与气候之间的关系,选取气温和降水量为气候因子变量。在绘制 NDVI 与气温和 NDVI 与降水相关关系分布图时分别控制好降水和气温的无关变量影响,并结合显著性检验从中再次提取出 $P<0.05$ 显著性水平的像元分析结果,如图 7 所示。

黑龙江省 NDVI 与温度的相关系数为-0.875~0.916,黑龙江省有 87.86% 的正相关像元和 12.14%的负相关像元,表明 NDVI 与气温呈高度正相关。对 NDVI 与温度之间的相关性进行显著性检验,并提取显著性水平为 $P<0.05$ 的相关像元。结果显示气温对 NDVI 的正相关作用区域从西向东横穿整个黑龙江省,而负相关作用的区域集中分布在黑龙江省最北和最南部。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

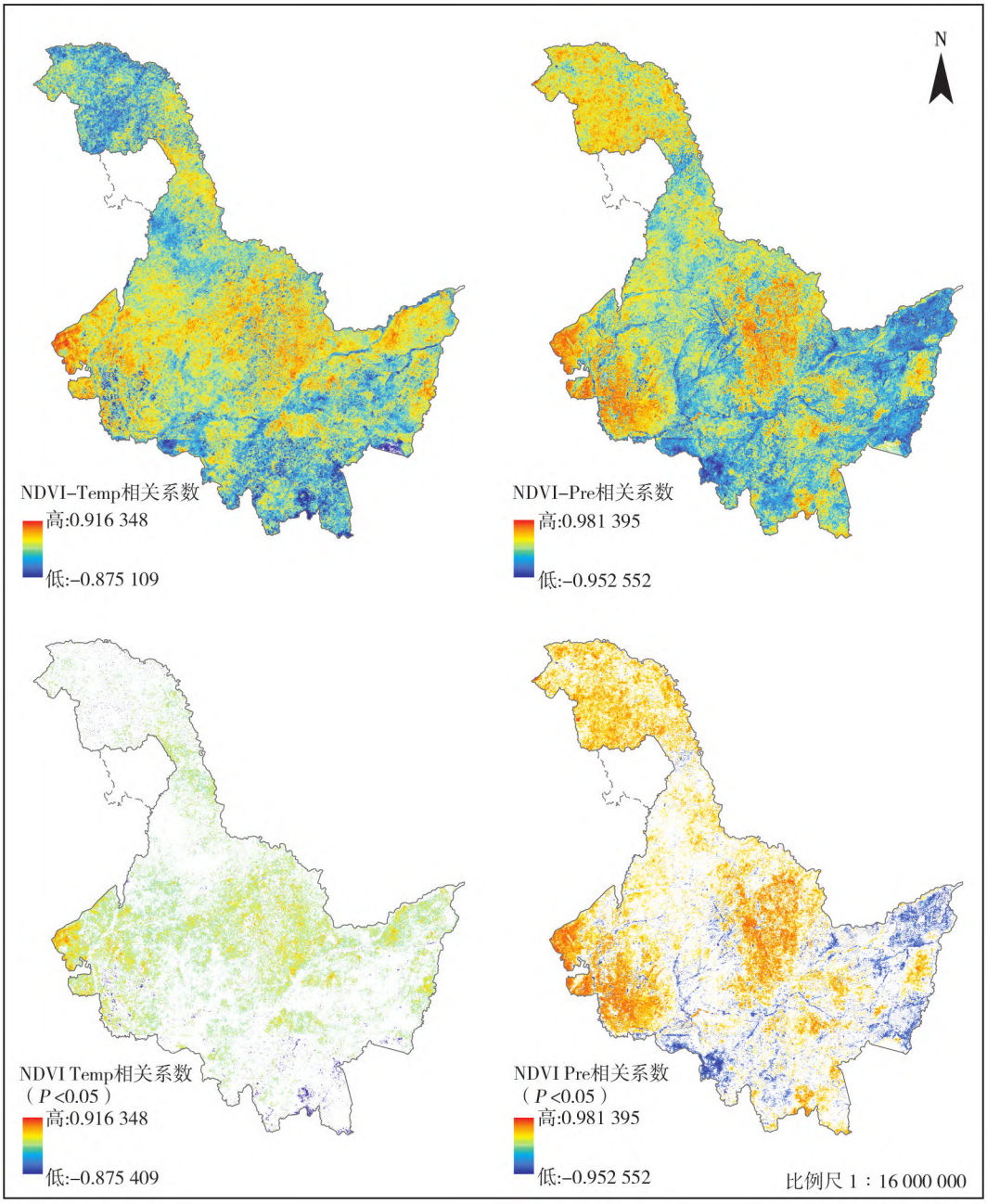


图 7　NDVI 与气温、降水的相关性空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of correlation between NDVI and temperature and precipitation

黑龙江省 NDVI 与降水的相关系数范围为-0.953~0.981,空间上全省存在 65.67%的正相关像元,34.33%的负相关像元,NDVI 与降水量呈高度正相关。对 NDVI 与降水量之间的相关性进行了显著性检验,并提取了显著性水平为 $P<0.05$ 的相关像元,结果显示降水对 NDVI 的正相关作用区域集中分布于黑龙江省中部、北部和西部,负相关区域相对集中在西南和东部。

分别计算不同植被覆盖类型 NDVI 与相应气温和降水的相关系数,并从中提取显著性水平为 $P<0.05$ 的像元,得到表 5。结果显示草地 NDVI 与气温和降水的相关性强度最高,且林地、草地、耕地 3 种植被的 NDVI 与气温的相关性均存在高度正相关关系,耕地 NDVI 与降水的相关性强度最低。耕地 NDVI 有近 40%的面积与降水呈负相关关系。气温和降水对 3 种植被 NDVI 的总体影响均为正相关,均值都大于 0。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 不同植被类型NDVI与气温、降水逐像元相关性统计

Tab. 5 Correlation statistics of NDVI with temperature and precipitation pixel by pixel for different vegetation

植被覆盖类型 Vegetation	气温/℃ Temperature			降水/mm Precipitation		
	正相关(%) Positive correlation	负相关(%) Negative correlation	均值 Mean	正相关(%) Positive correlation	负相关(%) Negative correlation	均值 Mean
耕地 Crop land	99.38	0.62	0.471	60.95	39.05	0.149
林地 Forest	97.00	3.00	0.454	91.96	8.04	0.475
草地 Grassland	98.89	1.11	0.488	92.70	7.30	0.563

分别计算不同季节NDVI与当季气温、降水的相关系数,并从中提取显著性水平为$P<0.05$的像元,分析后进行统计,得到表6。发现NDVI在夏季与气温的相关性最高,在秋季与降水的相关性最高,冬季与降水的相关性最低,原因可能是冬季是以雪的形式降水,积雪覆盖会对NDVI值计算产生影响。夏季有近30%面积的植被NDVI与气温的相关性呈负相关关系,原因可能是由于气候异常和黑龙江省地处纬度较高,7月份日照时数超过14 h的天数较多,抑制了植物的生长。超过30%的植被与春季降水量呈负相关关系,原因可能是黑龙江省整体处于中高纬度,存在局部高寒区域,3—5月土地存在积雪覆盖,并未完全消融,降水仍以雪为主,延缓了植物的生长季。总体来看气温和降水在春季、夏季和秋季均呈正相关影响。

表6 不同季节NDVI与气温、降水的像元相关性统计

Tab. 6 Correlation statistics of NDVI with temperature and precipitation pixel by pixel in different seasons

季节 Season	气温/℃ Temperature			降水/mm Precipitation		
	正相关(%) Positive correlation	负相关(%) Negative correlation	均值 Mean	正相关(%) Positive correlation	负相关(%) Negative correlation	均值 Mean
春季 Spring	99.61	0.39	0.59	69.94	30.06	0.212
夏季 Summer	73.71	26.28	0.652	98.95	1.05	0.235
秋季 Autumn	97.11	2.89	0.471	85.44	14.56	0.382
冬季 Winter	98.07	1.93	0.581	32.72	67.28	−0.188

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过对2000—2020年黑龙江植被变化情况进行调查研究,确定了黑龙江植被的覆盖现状总体上呈增长态势,但增长速度相对减缓。在对大区域植被覆盖变化进行研究时,需要将区域内人类行为、自然环境2个要素的影响纳入研究范围内。

满卫东等[35]指出黑龙江省自1998年,开始执行退耕还林的政策措施,政策实施后,在黑龙江地区进行了全部退耕还林的还草任务。在2000—2013年黑龙江省23.38%的农田变为森林,11.75%的农田变为草地,曾经荒废的荒地在经过了多年的治理之后,植被又得到了修复,退耕还林还草工作取得了较大成绩,在本研究中耕地、林地和草地的NDVI也呈年际间显著增加。说明人为因素对植被覆盖的影响是重要的因素之一,政策、人口和科技等人类因素都将可能成为直接或间接影响植物生长和植被覆盖的原因。黑龙江省城区和高海拔地区植被盖度变化呈逐渐改善趋势,其他地形植被盖度变化呈恶化趋势,造成这种变化的原因可能是农田复垦面积的增加和城市化进程的加快。

由于黑龙江省地理位置和植被覆盖类型的独特性,在研究植被覆盖时应对全年植被覆盖变化和生长季植被覆盖变化进行区分研究。研究得出2000—2020年黑龙江省植被NDVI在时间上呈显著增长,在空间上以改善为主且未来持续改善趋势明显。这与石淞等[36]的研究结果一致。罗新兰等[37]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

研究认为在植被生长发育过程中,降水的影响相对较小,温度成为控制植物生长发育的重要控制因子。黑龙江省地处中高纬度,属于温带季风气候,降水和植物覆盖指数在空间上具有比较显著的差异性,且大部分区域年内存在长期的低温且积雪覆盖的现象,植物休眠期也比较漫长,降雨在夏季居多。在本研究中也指出不同季节下,不同的气候因子对黑龙江省植被生长的影响状况也不同,气温在春季和秋季对 NDVI 值正向影响远大于负向影响,而降水在夏季和秋季对 NDVI 值正向影响远大于负向影响。说明在不同地区的植被覆盖研究中应区分气候因子对各季节下植被生长情况的影响。省内年平均气温和降水变化趋势以上升为主,对于年内气温和降水的变化而言,春季气温上升会影响阔叶林和沼泽植被的生长时间,温度将成为影响植被覆盖度的关键因素,而夏季气温过高可能抑制了植被的生长,降水成为影响植被覆盖度的关键因素,国志兴等[38]的相关研究中也存在一致结果。

4.2　结论

1)从 NDVI 角度来看,近 21 a 来黑龙江省植被整体覆盖水平良好,生长季年均 NDVI 为 0.91。空间分布上,黑龙江省有 92.5%高植被覆盖区域,主要分布于黑龙江省的中部及南部;有 0.7%低植被覆盖区域,主要分布在黑龙江省的东西两侧。

2)从不同土地类型 NDVI 和季节气候的角度来看,黑龙江省的植被在春夏秋冬 4 个季节与降水和温度的相关性均为正($P<0.05$),且黑龙江省年内 NDVI 变化存在明显的季节特征,仅夏季 NDVI 显著增加($P<0.05$)。年内 NDVI 均值 2 月最低(0.11),7 月最高(0.85)。全省有 39.05%面积耕地的植被变化与降水呈负相关关系,春季有 30.06%的植被变化与降水呈负相关关系,夏季有 26.28%的植被变化与气温呈负相关关系。对耕地、林地、草地的 NDVI 进行年际稳定性定量和定性分析后发现,草地 NDVI 稳定性最高($C_v=0.002\ 1$),全省 NDVI 变化也较为稳定。

3)从 NDVI 年际变化和未来持续性分析,近 21 年黑龙江省 NDVI 整体显著上升,累计增长了 14.6%,速度每 10 a 增长为 4.7%($P<0.05$),增加速率从小到大为耕地、草地、林地。其中全省植被 NDVI 呈显著增加趋势的区域占全省总面积的 35.55%($P<0.05$),主要分布在黑龙江省中部、西部和北部。黑龙江省在未来植被 NDVI 的变化趋势良性方向(43.6%)多于恶性方向(35.33%),且未来有 69.5%的未来变化趋势与过去的变化方向是同向的。

植被覆盖变化对环境的响应是一个多因素驱动影响的过程,本研究的局限在于仅探究了植被变化同气温、降水量的关系,并未进一步讨论 NDVI 与高程、坡度及土壤等其他地形地貌因素的关系,对于不同经纬度的同种植物及相同经纬度的不同种植物存在不同的生长变化趋势,这一点仍需在后续研究中进行思考。此外,本研究在植被覆盖的分类中也未对各土地利用类型的植物进行分类分析,上述因子对不同种类植物的影响也不同,这些问题需要在后续的研究中进一步探讨。

【参　考　文　献】

[1] 唐见,曹慧群,陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化[J]. 地理学报,2019,74(1):76-86.
TANG J, CAO H Q, CHEN J. Effects of ecological conservation projects and climate variations on vegetation changes in the source region of the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 76-86.

[2] 吴正方,靳英华,刘吉平,等. 东北地区植被分布全球气候变化区域响应[J]. 地理科学,2003,23(5):564-570.
WU Z F, JIN Y H, LIU J P, et al. Response of vegetation distribution to global climate change in northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(5): 564-570.

[3] 刘雪佳. 中国陆地主要植被类型生产力及其与气候因子的关系[D]. 太原:山西大学,2019.
LIU X J. Main land vegetation productivity and their relationship with climatic factors in China [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.

[4] 赵健赟,丁圆圆,杜梅,等. 基于遥感植被指数的青海高原植被覆盖对气候变化的响应关系分析[J]. 中国水土保持,2022(3):41-44,7.
ZHAO J Y, DING Y Y, DU M, et al. Response of vegetation cover to climate change in Qinghai Plateau based on remote sensing vegetation index[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(3): 41-44, 7.

[5] 金凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
JIN K. Spatio-temporal variations of vegetation cover and its relationships between climate change and human activities over China[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.

[6] 耿庆玲,陈晓青,赫晓慧,等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. 生态学报,2022,42(9):3557-3568.
GENG Q L, CHEN X Q, HE X H, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3557-3568.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] 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.
XU Y, HUANG W T, LU M Y, et al. Vegetation cover change and the relative role of climate change and human activities in southwest Karst areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 292-299.

[8] 张一然,文小航,罗斯琼,等. 近 20 年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究[J]. 高原气象,2022,41(2):317-327.
ZHANG Y R, WEN X H, LUO S Q, et al. Study on the relationship between vegetation cover change and climate factors in Zoige wetland in recent 20 years[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(2): 317-327.

[9] 邓椿,蒋晓辉,聂桐,等. 山西省植被覆盖度多因子探测特征与驱动力分析[J]. 环境科学与技术,2022,45(2):182-191.
DENG C, JIANG X H, NIE T, et al. Multi-factor detection characteristics and driving force analysis of vegetation coverage in Shanxi Province[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(2): 182-191.

[10] 邱凤婷,过志峰,张宗科,等. 大湄公河次区域植被覆盖时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(2):187-195.
QIU F T, GUO Z F, ZHANG Z K, et al. Spatio-temporal change characteristics of vegetation coverage and its relationship with meteorological factors in the Greater Mekong Subregion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(2): 187-195.

[11] 李雨鸿,陶苏林,李荣平,等. 辽宁省植被覆盖度时空演变及其对气候因子的响应[J]. 气象与环境学报,2020,36(5):86-90.
LI Y H, TAO S L, LI R P, et al. Spatio-temporal evolution of vegetation coverage and its responses to climatic factors in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(5): 86-90.

[12] REES M, CONDIT R, CRAWLEY M, et al. Long-term studies of vegetation dynamics[J]. Science, 2001, 293(5530): 650-655.

[13] 何利平,简季. 四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. 水土保持通报,2022,42(2):203-209.
HE L P, JIAN J. Remote sensing dynamic monitoring on temporal and spatial changes of vegetation coverage in Sichuan Province from 2009 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 203-209.

[14] ALENCIA DELGADO D, HERNANDEZ PALMA J, FASSNACHT F, et al. Estimation of aerial biomass using discrete-wave LiDAR data in combination with different vegetation indices in plantations of *Pinus radiata* (D. DON), Region del Maule, Chile[J]. Sustainability, Agri, Food and Environmental Research, 2014, 2(3): 30-49.

[15] TOWNSHEND J R G, GOFF T E, TUCKER C J. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(6): 888-895.

[16] 桑国庆,唐志光,邓刚,等. 基于 MODISNDVI 时序数据的湖南省植被变化研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(5):1100-1109.
SANG G Q, TANG Z G, DENG G, et al. Study on vegetation change in Hunan Province based on MODIS NDVI time series data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(5): 1100-1109.

[17] 刘艳丽. 基于 LandsatTM 影像监督分类的土地利用探究:以张掖地区为例[J]. 现代园艺,2020,43(24):141-143.
LIU Y L. Study on land use based on Landsat TM image supervision classification—a case study of Zhangye region[J]. Xiandai Horticulture, 2020, 43(24): 141-143.

[18] 王涛,赵元真,王慧,等. 基于 GIMMSNDVI 的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J]. 冰川冻土,2020,42(2):641-652.
WANG T, ZHAO Y Z, WANG H, et al. Spatial and temporal changes of vegetation index and their response to temperature and precipitation in the Tibetan Plateau based on GIMMS NDVI[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 641-652.

[19] 刘正才,屈瑶瑶. 基于 SPOT-VGT 数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报,2019,41(2):80-87.
LIU Z C, QU Y Y. Vegetation change and its response to climate change based on SPOT-VGT in Hunan Province of Southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 80-87.

[20] 于信芳,庄大方. 基于 MODISNDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学,2006,28(4):111-117.
YU X F, ZHUANG D F. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 111-117.

[21] 王正兴,刘闯,HUETE Alfredo. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报,2003,23(5):979-987.
WANG Z X, LIU C, ALFREDO H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979-987.

[22] MENG X Y, GAO X, LI S Y, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982-2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 603.

[23] GHOLAMNIA M, KHANDAN R, BONAFONI S, et al. Spatiotemporal analysis of MODIS NDVI in the semif-arid

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

region of Kurdistan (Iran)[J]. Remote Sensing, 2019, 11(14): 1723.

[24] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(9):1255-1268.
MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in inner Mongolia during 2001-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268.

[25] 易扬,胡昕利,史明昌,等. 基于 MODISNDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系[J]. 生态学报,2021,41(19):7796-7807.
YI Y, HU X L, SHI M C, et al. Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in the middle reaches of the Yangtze River Based on MODIS NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7796-7807.

[26] 贾建英,郭建平. 东北地区近 46 年气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):109-115.
JIA J Y, GUO J P. Characteristics of climate change in northeast China for last 46 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 109-115.

[27] 高永刚,那济海,顾红,等. 黑龙江省气候变化特征分析[J]. 东北林业大学学报,2007,35(5):47-50.
GAO Y G, NA J H, GU H, et al. Characteristic analysis of climate change in Heilongjiang Province during 1961-2003[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(5): 47-50.

[28] JING W L, YANG Y P, YUE X F, et al. A spatial downscaling algorithm for satellite-based precipitation over the Tibetan Plateau based on NDVI, DEM, and land surface temperature[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 655.

[29] 荆文龙,冯敏,杨雅萍. 一种 NCEP/NCAR 再分析气温数据的统计降尺度方法[J]. 地球信息科学学报,2013,15(6):819-828.
JING W L, FENG M, YANG Y P. A statistical downscaling approach of NCEP/NCAR reanalysis temperature data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(6): 819-828.

[30] YANG J E, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[31] 张涵丹,卫伟,薛萐. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究,2015,22(6):183-189.
ZHANG H D, WEI W, XUE S. Analysis on the variation of temperature and precipitation in Dingxi based on R/S and Mann-Kendall test[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 183-189.

[32] 张殷钦,胡伟,刘俊民. 基于 R/S 分析法的地下水位动态变化趋势分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(12):4912-4916.
ZHANG Y Q, HU W, LIU J M. Groundwater level regime variation trend on basis of rescaled range analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(12): 4912-4916.

[33] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. 干旱区地理,2008,31(2):175-181.
FENG X L, FENG Z L, LUO L C, et al. Fractal analysis of climate change and Hurst index experiment in Tibetan Plateau in future[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 175-181.

[34] 曹永强,周姝含,杨雪婷. 近 20 年辽宁省植被动态特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2022,42(14):5966-5979.
CAO Y Q, ZHOU S H, YANG X T. Vegetation dynamics and its response to climate change in Liaoning Province in last 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5966-5979.

[35] 满卫东,王宗明,刘明月,等. 1990—2013 年东北地区耕地时空变化遥感分析[J]. 农业工程学报,2016,32(7):1-10.
MAN W D, WANG Z M, LIU M Y, et al. Spatio-temporal dynamics analysis of cropland in Northeast China during 1990-2013 based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 1-10.

[36] 石淞,李文,丁一书,等. 东北地区植被时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J/OL]. 中国环境科学:1-14[2023-01-26].
SHI S, LI W, DING Y S, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation and its response to climate change and human activities in northeast China[J/OL]. China Environmental Science, 1-14[2023-01-26].

[37] 罗新兰,李英歌,殷红,等. 东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应[J]. 生态学杂志,2020,39(2):412-421.
LUO X L, LI Y G, YIN H, et al. Response of NDVI to SPEI at different temporal scales in Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 412-421.

[38] 国志兴,王宗明,宋开山,等. 1982—2003 年东北林区森林植被 NDVI 与水热条件的相关分析[J]. 生态学杂志,2007,26(12):1930-1936.
GUO Z X, WANG Z M, SONG K S, et al. Correlations between forest vegetation NDVI and water/thermal condition in Northeast China forest regions in 1982-2003[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 1930-1936.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net