

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0075

王子龙,孙昌鸿,刘莹,等. 黑龙江省植被指数时空变化及其对气候因子的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):737-747. WANG Z L,SUN C H,LIU Y,et al. Spatiotemporal variation of vegetation index and its response to climate factors in Heilongjiang Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(4):737-747. (in Chinese)

黑龙江省植被指数时空变化及其对气候因子的响应

王子龙,孙昌鸿,刘莹,姜秋香,朱彤

(东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030)

摘要:为探究全球气候变暖条件下黑龙江省覆被变化特征,基于1982—2015年GIMMS(global inventory modeling and mapping studies)NDVI3g(normalized difference vegetation index-3rd generation)数据,利用趋势分析、Hurst指数法和相关性分析法,分析黑龙江省近34年的植被指数时空变化规律和未来趋势,同时结合省内34个气象站点数据,分析归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)与气温、降水及蒸散量的响应特征。结果表明:黑龙江省3种植被覆盖类型的NDVI均呈缓慢上升趋势,其中,林地和草地NDVI增速为0.004/10 a,农田NDVI增速为0.002/10 a;植被覆盖的整体变化先升高后降低,其中最大值出现在2014年,最小值出现在1984年;全省植被覆盖空间格局呈东高西低的分布特征,以“大兴安岭—伊春—鹤岗—佳木斯—双鸭山”为界限,西南地区植被覆盖较为丰富,而东北部地区植被覆盖较少;全省植被变化的同向特征强于反向特征,持续性区域和反持续性区域分别占总面积的97.65%和2.35%;植被覆盖变化与气温相关性高于降水,蒸散与植被指数的相关性在年均和生长季差异性较显著,气温是影响生长季植被覆盖变化的主要气候因子。研究结果可为气候变化背景下寒区土地利用/覆被变化研究提供一定的理论支撑。

关键词:植被覆盖;GIMMS NDVI3g;气候响应;Hurst指数;相关性分析

中图分类号:TV11 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



气候环境和人类活动对植被覆盖变化产生的干扰响应已成为研究热点,受到生态学术界高度关注^[1-3]。植被作为生态系统中影响物质循环和能量转换的关键,是维持生态稳定的重要因素^[4]。同时,植被具有防治土地沙化、农业水土流失及水土保持稳定等功能^[5-6]。地表植被覆盖会受自然条件和人类活动影响产生变化^[7]。其中,气候成为最为重要的自然因素,直接决定地表植被的种类和数量^[8-9]。植被因气候变化组织结构发生改变从而影响生物量的变化^[10]。

研究植被动态变化规律已取得一定进展。归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)NDVI具有数据空间分辨率较高、数据获取方便等优点,被广泛应用于黄土高原^[11]、雅鲁藏布江流域^[12]及全国范围内^[13]的植被动态变化监测。国内外学者在研究气候因子与NDVI的关系中发现气温和

降水对NDVI的影响最为明显。有学者^[14]发现干旱指数对NDVI存在一定影响,但在中国北方^[15-16]、汉江流域^[17-18]以及全国范围内^[19]的研究表明气温和降水仍是主导因子。此外,也有研究^[20-23]发现GIMMS NDVI3g(global inventory modeling and mapping studies normalized difference vegetation index-3rd generation)数据对监测植被动态规律的适用性和可行性。学者们^[24]通过对比分析发现NDVI3g数据更适用于北半球高纬度地区,并基于该数据研究植被时空变化规律^[25]和气候变化对NDVI的影响^[26]。

前人的研究多为全国尺度或区域和流域范围,且国内学者多使用NDVIg数据探讨植被覆盖变化。对东北地区,多聚焦于植被生长状况和物候期的研究^[27-28],但针对黑龙江省使用GIMMS NDVI3g数据

收稿日期:2022-01-20 修回日期:2022-06-07 网络出版时间:2022-06-17

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220617.0924.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52179035;51579045);黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E004)

作者简介:王子龙(1982—),男,山东胶州人,教授,博士,主要从事寒区水土资源高效利用研究。E-mail:wangzilong2017@126.com

通信作者:姜秋香(1982—),女,黑龙江佳木斯人,副教授,博士,主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail:jiangqiuxiang2017@163.com

监测植被动态特征,以及 NDVI 与蒸散量的响应关系研究并不多见。本研究基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g、降水、气温、蒸散及植被类型数据,利用 Pearson 相关分析法、Hurst 指数法,分析黑龙江省植被覆盖的时空变化特征及其气候响应,以期为黑龙江省土地利用/覆被变化研究提供理论依据。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

黑龙江省地处中国最北端,气候较为干燥寒冷、降水集中。年平均降水量为 400~700 mm,平均年水资源总量 775.8 亿 m^3 ,平均年产水模数为 16.6 万 m^3 。黑龙江省分为 3 个植被类型区域,包括温带草原、寒带灌木丛、植被相对覆盖度高,主要植被类型为耕地、森林和草地。黑龙江省土地利用状况有:耕地占总面积的 35%;林地占总面积的 48.2%;草地仅占总面积的 4.5%。本研究采用的植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中提供的《1:1 000 000 中国植被图集》。将黑龙江省植被类型划分为阔叶林、针叶林、针阔混合林、灌丛、草原、草甸、沼泽和栽培植被等 8 大类。大兴安岭地区植被多为针叶林,松嫩平原和三江冲积低平原地区被草原和草甸、沼泽和栽培植被覆盖,针阔混合林、阔叶林和灌丛多分布于小兴安岭、张广才岭和老爷岭等地区。其中分布于松嫩平原和三江平原的栽培植被如水稻、玉米和大豆作为农田主要种植作物,生长期普遍在 4—10 月份,黑龙江中部覆盖度较高的阔叶林生长期在 6—8 月份而针阔混合林生长期在 4—10 月份。

1.2 数据来源与处理

归一化植被指数(NDVI)是由美国国家航空航天局对外开放提供的(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>)。选取已修正最小程度太阳高度角、传感器误差和偏移等影响的 GIMMS AVHRR(advanced very high resolution radiometer)NDVI 全球植被指数资料,最新推出的时间序列较长的 GIMMS NDVI3g 数据,空间分辨率通常为 $0.083\ 3^\circ \times 0.083\ 3^\circ$,时间尺度为 15 d。时间起止范围为 1981 年 7 月—2015 年 12 月,为探究数据的整体规律性,选取 1982—2015 年的数据研究。

将 GIMMS AVHRR NDVI3g 数据进行预处理,包括格式转换、裁剪、投影转换、重采样等。通过最大值合成法(maximum value composition, MVC)削弱数据中大气水汽、云层覆盖及非火山岩气溶胶的干扰,得到 1982—2015 年研究区的 NDVI 月值和年值。为

反映植被年均和作物生长季 NDVI 变化特征,采用生长季(4—10 月)NDVI 合成数据表征植被的生长情况,生长季用时段内的月平均 NDVI 值计算得出。

本研究依据中国气象科学数据共享服务网站(<http://cdc.cma.gov.cn/>)获取气象数据。选取黑龙江省 34 个气象站点 1982—2015 年的逐日气象数据,计算成累月和逐年的降水、气温数据,蒸散量数据的计算和 Hurst 指数法来自文献[29],同时采用克里金插值方法将像元大小处理成与 NDVI 相符合、投影一致的气象要素栅格数据。

1.3 研究方法

采用趋势分析法、Hurst 指数法和 Pearson 相关分析法研究黑龙江省植被覆盖的动态变化规律及其气候响应。

1.3.1 趋势分析法

趋势分析法是一种利用线性回归分析将时变变量进行计算,判断变量年际变化的显著性,从而来预测其变化趋势的方法。采用一元线性回归法拟合,基于 1982—2015 年的逐年 NDVI 的数据,用斜率值来反映 NDVI 的变化趋势^[30]。其中:当斜率大于 0 时,NDVI 变化呈显著增加趋势;当斜率小于 0 时,NDVI 变化呈显著减小趋势;当斜率为 0 时,NDVI 变化趋势不显著。

1.3.2 Hurst 指数法

Hurst 指数由水文学家 Hurst 提出^[31],主要用来定量表述具有长程依赖性的时间序列,目前应用于水文、地质、气候和地震等领域。Hurst 指数 H 的范围为 0~1,对应有 2 种情况:当 H 位于 0~0.5 时,时间序列具有长期的持续性,同时相对于未来趋势相反,表现为反持续性, $H \approx 0$ 时,反持续性越强;当 H 位于 $>0.5 \sim 1.0$ 时,时间序列具有长期的持续性,同时相对于未来趋势一致,表现为持续性, $H \approx 1$ 时,持续性越强^[32]。基于 1982—2015 年 NDVI 的变化趋势和 H 值所处的范围,分析 NDVI 的未来变化趋势是否与研究序列一致,从而预测未来 NDVI 的变化趋势。

1.3.3 Pearson 相关分析法

皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient)是一种可以反映出 2 个变量间线性相关程度的统计量。它是 2 个变量之间的协方差和标准差的商。协方差表示 2 个变量总体误差的期望,用于度量各个维度偏离自身均值的程度^[33];若结果为负值,则说明 2 个变量之间呈现负相关;若结果为正值,则说明 2 个变量之间呈现正相关;若结果为 0,则说明 2 个变量之间没有关系,相互独立。通过皮尔森相关系数分别

分析研究区内 NDVI 与降水量、平均气温和蒸散量的相关关系,研究气候因子对 NDVI 的影响。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时间变化分析

黑龙江省的植被类型主要以农田、林地和草地为主,NDVI 呈较缓上升趋势,1982—2015 年 NDVI 多年平均值为 0.55,趋势为 0.003/10 a。其中,2014 年 NDVI 达到最大值为 0.57,NDVI 最小值出

现在 1984 年为 0.53,见图 1(a)。3 种不同植被覆盖类型的 NDVI 均呈现上升趋势,其中林地和草地的上升趋势均为 0.004/10 a,相比之下农田增长速率较为缓和为 0.002/10 a。农田 NDVI 的动态变化范围在 0.48~0.51,波动不大,变化不剧烈;林地 NDVI 的动态变化范围在 0.59~0.65,相比较于农田,植被覆盖较为茂盛,归一化植被指数相对较高;草地 NDVI 的动态变化范围在 0.51~0.56,在这 3 种植被覆盖类型中位于中间水平,见图 1(b)。

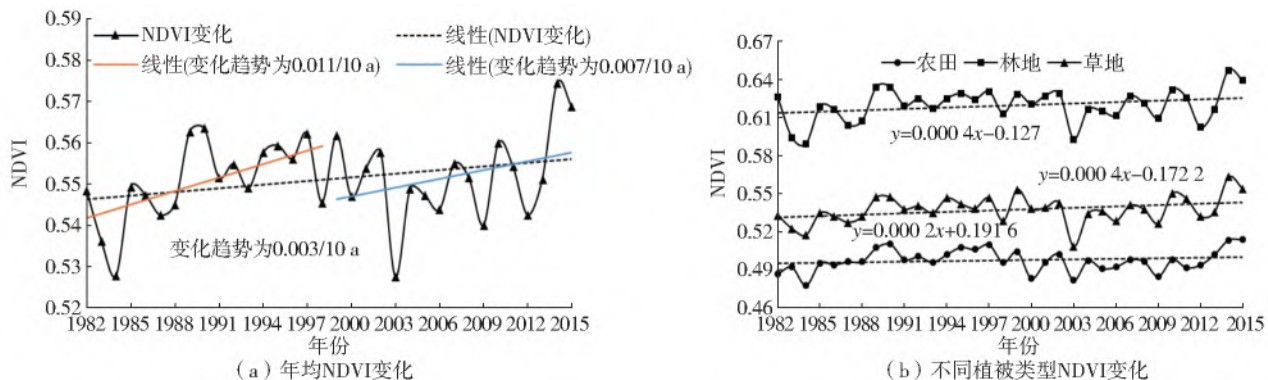


图 1 年均 NDVI 及不同植被类型 NDVI 变化趋势

Fig. 1 The variation trend of NDVI of annual average and different vegetation types

黑龙江省主要植被类型中农田种植作物覆盖较广且受人类活动影响较大,在作物生长期植被覆盖率有显著变化,因此探究作物生长季 NDVI 变化有助于理解黑龙江省覆被变化特征。在生长季,不同植被类型下 NDVI 变化趋势见图 2,在黑龙江省设定生长季为 4 月至 10 月,研究时段内生长季 NDVI 变化范围在 0.65~0.72 波动,变化速率为 0.003/10 a。其中,NDVI 最小值出现在 2003 年为 0.65,最大值出现在 2014 年和 2015 年为

0.71。1982—1998 年,NDVI 变化速率为 0.013/10 a,其中:农田以 0.014/10 a 呈增长态势;林地以 0.013/10 a 呈上升趋势;草地以 0.011/10 a 呈增加趋势。1999—2015 年,NDVI 变化速率较为迟缓,但农田 NDVI 变化速率较高以 0.013/10 a 的速率呈现增长态势。相比于秋季和夏季,在作物生长季的物候期间,NDVI 变化在不同植被覆盖类型下较为剧烈,其中农田在 1998—2015 年的变化速率尤为明显。

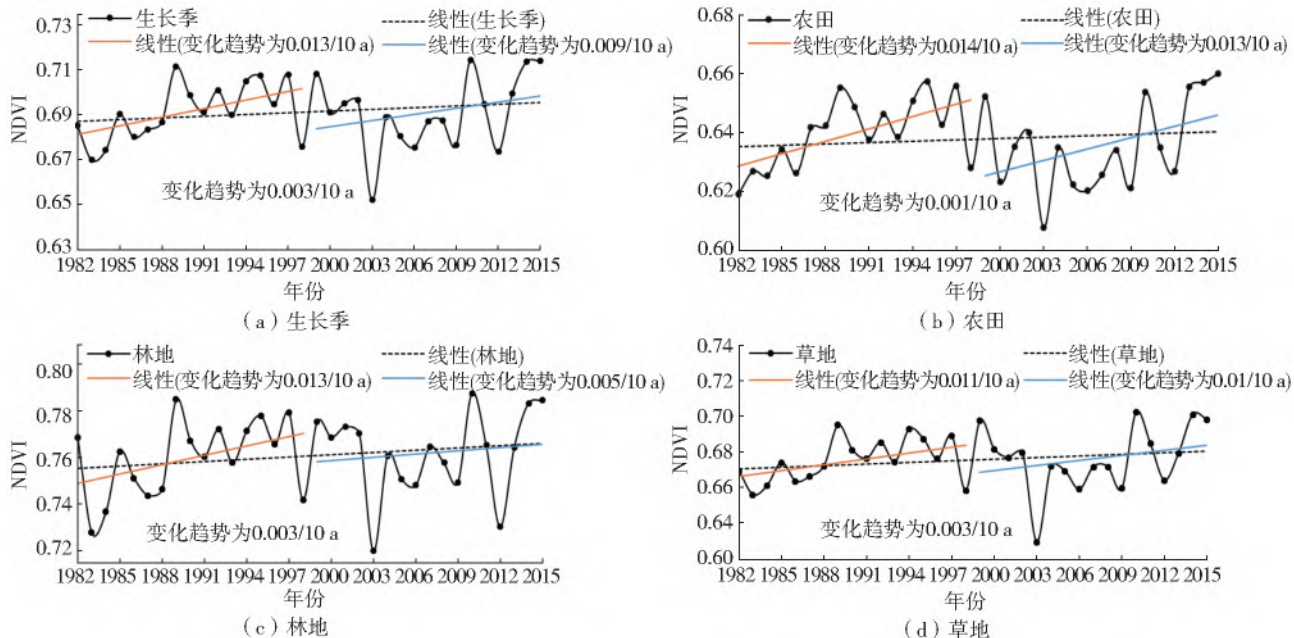


图 2 不同植被类型生长季 NDVI 变化趋势

Fig. 2 Variation trend of NDVI in the growing season of different vegetation types

2.2 植被覆盖空间变化分析

利用 ArcMap 10.5 软件绘制出 1982—2015 年黑龙江省年均和季节 NDVI 空间分布(图 3),可以看出 NDVI 分布明显的空间异质性,在全省呈现出自西向东先逐渐上升随后又下降的趋势,年均 NDVI 在 0.10~0.59 浮动,见图 3(a)。全省 NDVI 均值最高区域在大兴安岭、牡丹江和伊春等地区,这些地区植被覆盖面积普遍较广,NDVI 均值在 0.45 以

上,最高可达 0.59;NDVI 均值最低区域集中在西部和东部地区,NDVI 主要在 0.23~0.36。由图 3(b)可知,作物生长季 NDVI 在 0.20~0.72 变化,处于伊春、大兴安岭、鹤岗、双鸭山等地区的相对植被覆盖程度较高,年最大 NDVI 值均在 0.59 以上。在黑龙江省人口相对稠密和经济较为发达的哈尔滨、齐齐哈尔、大庆及绥化等地区,植被覆盖水平受人为因素的剧烈干扰。

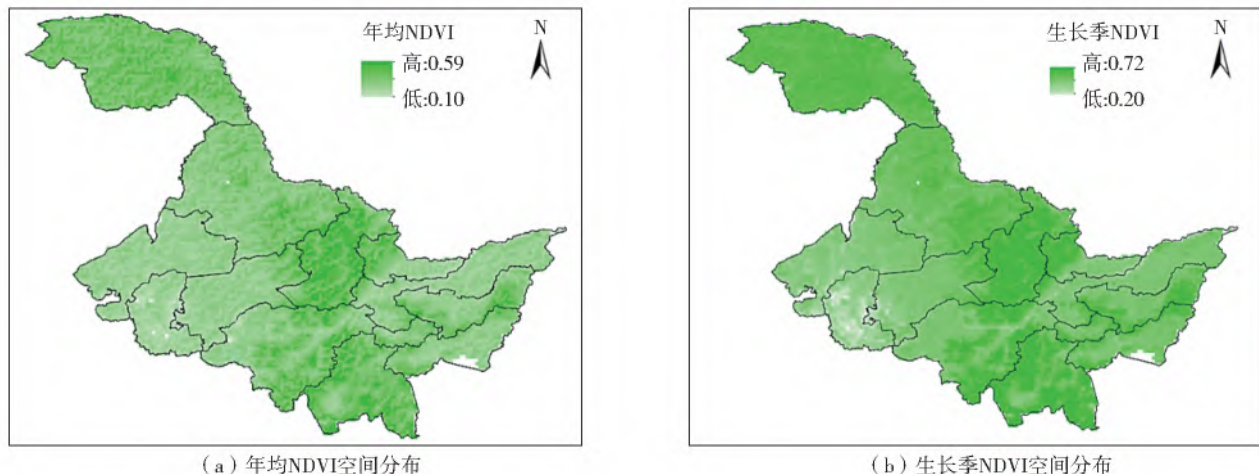


图 3 年均和生长季 NDVI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI for annual average and growing season

黑龙江省的植被生长状况在 1982—2015 年整体上有所改善,但各区域植被指数的变化趋势都不明显,整体上的变化趋势率在 $-0.004 \sim 0.004$ 波动。明显改善的区域主要位于黑龙江省的北部大兴安岭、西部松嫩平原偏南部和佳木斯部分地区及周围地区,明显退化区域出现在尼尔基流域、嫩江地区和克山地区一带,在三江平原地区也出现了略微下降趋势。1982—2015 年黑龙江省的年均和生长季植被覆盖度变化都不明显,但两者之间仍具有一定的差异性。增加程度较大的位于大兴安岭地区,NDVI 呈上升趋势且大于 0.003;绝大多数高海拔

地区如老爷岭、张广才岭和海拔较高地区如小兴安岭,其 NDVI 呈下降趋势且小于 -0.003 ,整体趋势范围变化不大;减少程度较为明显的位于三江平原的东南部地区和小兴安岭部分地区:见图 4(a)。平原地区作物生长季时因其耕地较多植被覆盖少,1982—2015 年 NDVI 变化不明显;山岭和林地生长季时 NDVI 上升趋势较为显著;草原地区的植被覆盖变化因其气候和人类活动因素呈下降趋势:见图 4(b)。由此可知,黑龙江省 1982—2015 年 NDVI 变化总体走向平缓,局部有些许变化。

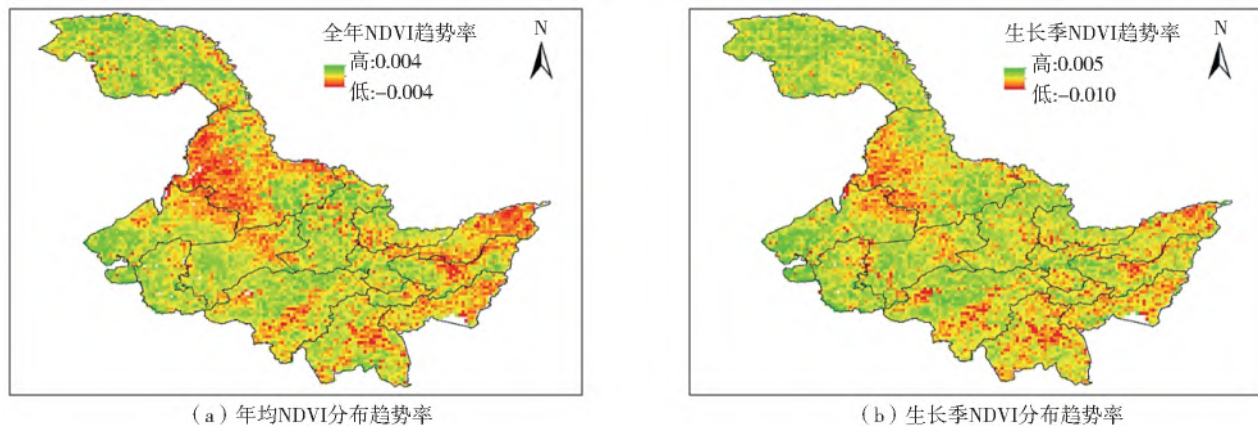


图 4 年均和生长季 NDVI 分布趋势率

Fig. 4 Distribution trend rate of NDVI for annual average and growing season

利用 Hurst 指数法根据 H 值所处的范围分析目前的变化趋势与未来变化趋势是否一致。统计不同类型所占研究区面积比例,对黑龙江省植被生长趋势进行分析,得出 NDVI 持续性变化的空间分布见图 5。黑龙江省呈现反持续性的区域占研究区总面积的 2.35%,其余区域均呈持续性即与未来变化趋势一致,整体 NDVI 呈持续性变化较为明显,分为 4 种情形:持续退化,持续稳定不变,持续改善,未来变化不确定。其中未来变化不确定包括前 3 种组

合,因此无法确定未来趋势。NDVI 未来变化不确定区域集中分布在松嫩平原、中部地区以及三江平原南部地区;在黑龙江省北部的大兴安岭地区呈现出退化的趋势,未来趋势也将持续退化;NDVI 持续改善的地区在全省分布均匀;见图 5(a)。在植被生长季,未来 NDVI 变化不确定的区域主要分布在铁力站和伊春站附近,未来在西部的齐齐哈尔、龙江及在嫩江站北部的局部区域 NDVI 呈现持续退化,NDVI 持续稳定不变和持续改善的面积占比相似,见图 5(b)。

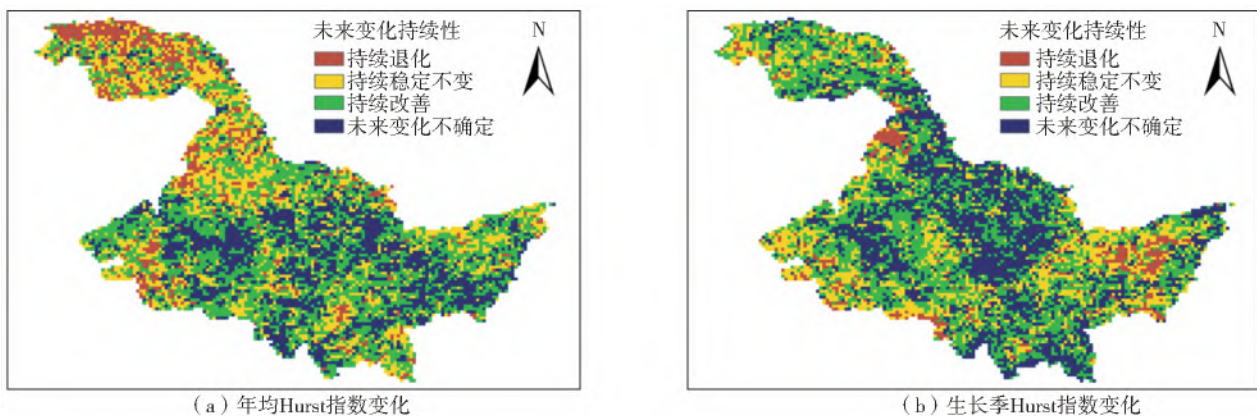


图 5 年均和生长季 NDVI 的 Hurst 指数变化

Fig. 5 Changes of Hurst index of NDVI for annual average and growing season

2.3 降水量与 NDVI 的响应关系

植被指数在反映全球气候变化和表征地表植被生态及其生产力状况方面具有重要作用。北半球植被对气候变化非常敏感,在陆地和大气之间的碳循环中起着重要作用。利用 1982—2015 年的 NDVI 和气象站点气候资料,应用 NDVI 与气候变量的趋势检测方法和相关分析方法,分析黑龙江省植被 NDVI 对降水量在全年和植被生长季的响应关系。

NDVI 的变化趋势与降水量的相关关系有较好的一致性,植被生长季 NDVI 对降水的响应与年均 NDVI 对降水的响应存在异质性。1982—2015 年黑龙江省年均降水量与 NDVI 总体相关系数在 $-0.86 \sim 0.87$, P 值小于 0.01,显著性较好[图 6(a)]:年均降水量与 NDVI 呈现出正相关的区域集中在西部地区;年均降水量与 NDVI 呈现出负相关的区域分别在中部地区和三江平原的东北部地区。

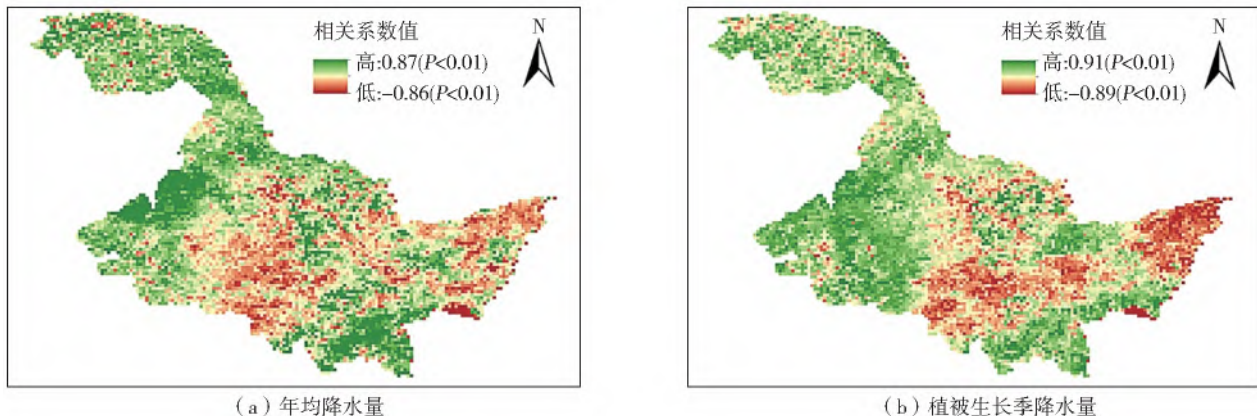


图 6 年均降水量、植被生长季降水量与 NDVI 的相关关系

Fig. 6 Correlation between annual average and growing season precipitation and NDVI

黑龙江省植被生长季降水量和 NDVI 的相关关系见图 6(b)。植被生长季降水量与 NDVI 呈负相关的地区主要位于大兴安岭、老爷岭和小兴安岭

等山区,因受其海拔高度影响,当降水增加时温度偏低,所以整体趋势呈负相关。植被生长季降水量与 NDVI 呈较显著正相关的地区分布于松嫩平原和三

江平原,其降水少温度高导致水分成为影响生长趋势的主要因素。研究表明,黑龙江省降水对植被生长季的结束期影响较高,植被生长季 NDVI 主要受降水调节。

2.4 平均气温与 NDVI 的响应关系

在全年尺度上,平均气温与 NDVI 总体呈正相关地区集中分布在黑龙江省的东南地区,包括勃利、鸡西、依兰、佳木斯和牡丹江一带,相关系数最高达到 0.83,表明随着温度上升,全省总体植被覆盖率增大。对于黑龙江省西部如松嫩平原地区,部分中

部如明水、海伦等站点,气温的升高并不能让植物生长得更好,反而呈现出负相关系数,最高达 -0.59 ,见图 7(a)。植被生长季气温与 NDVI 的相关关系同年均相比差别较大,1982—2015 年植被生长季气温与 NDVI 主要呈正相关,最明显的位于大兴安岭地区,因其属高海拔高寒地区,气温对植被的影响更为显著。在全省大部分草地地区,气温与 NDVI 呈负相关,气温变化对全省大部分地区的 NDVI 影响较小,见图 7(b)。

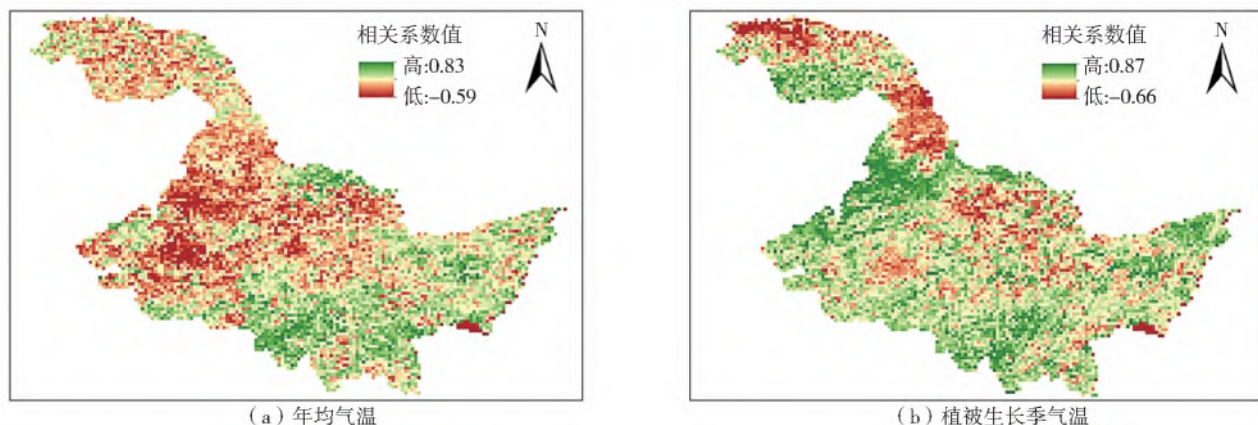


图 7 年均气温和植被生长季平均气温与 NDVI 的相关关系

Fig. 7 Correlation between average annual and growing season air temperature and NDVI

2.5 蒸散量与 NDVI 的响应关系

1982—2015 年黑龙江省蒸散量与 NDVI 的相关性较低,相关系数在 $-0.58 \sim 0.70$,见图 8(a)。相关系数较高的地区集中在北部,主要分布在大兴安岭地区,蒸散量的增加对山区植被生长有促进作用。蒸散量与 NDVI 呈负相关的地区集中在齐齐哈尔、大庆和哈尔滨等城市,植被生长季 NDVI 与

蒸散量的相关关系与全年略有不同,相关系数最高为 0.85,相关系数最低为 -0.24 ,见图 8(b)。蒸散量与 NDVI 呈正相关的地区集中分布在松嫩平原的东北部和中部地区的偏南部。黑龙江纬度较高北部寒冷,因此蒸散量较少,植被缺乏呼吸作用长势下降。在全省西南部如齐齐哈尔、大庆等地区,蒸散量与 NDVI 呈负相关。

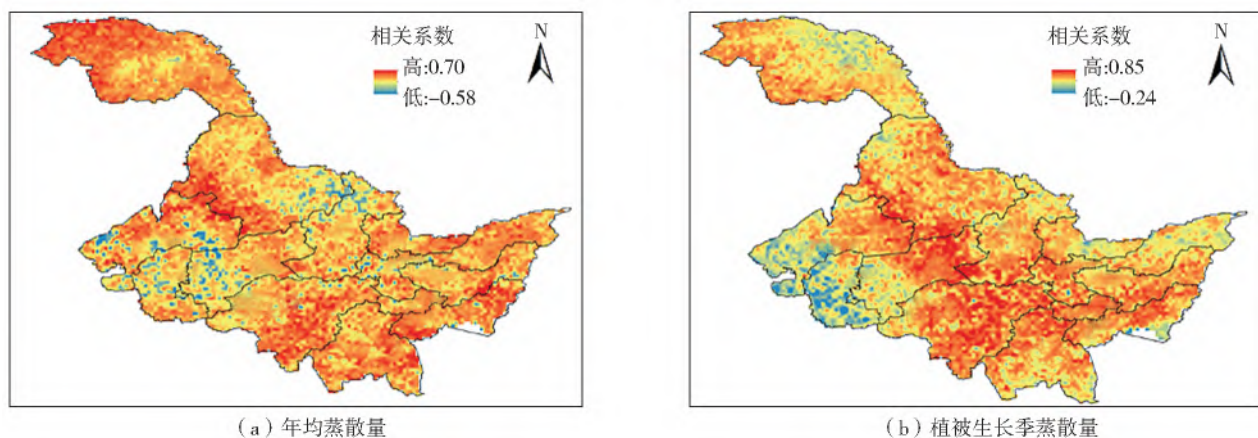


图 8 年均蒸散量和植被生长季蒸散量与 NDVI 相关关系

Fig. 8 Correlation between annual average and growing season evapotranspiration and NDVI

3 讨论

通过对 1982—2015 年的黑龙江省植被变化趋

势进行分析可知,黑龙江省植被覆盖情况呈现逐步缓慢改善,相比于人口密集的城市,改善程度明显偏低,其主要原因是受到人为因素的影响。从 1998 年

开始在黑龙江省实施退耕还林政策,黑龙江省西南地区就开始了全面的退耕还林还草工作,仅在黑龙江省的齐齐哈尔市 1998—2014 年 17 年的退耕还林还草工作就取得了较大成绩,造林面积达到了 13.48 万 hm^2 ,改造荒山面积 6.78 万 hm^2 ,原来已经荒废的荒地,经过几年的建设植被已经基本得到了恢复^[34]。在黑龙江省城市区和高海拔地区植被覆盖变化呈现小幅上升的趋势,其他地形植被覆盖率呈现减少的趋势,产生这种减少态势的原因可能是农田开垦面积的增加和城市化进程的加速。

国志兴等^[35]指出在 1984 年出现严重干旱情况,因此 NDVI 有所降低,影响了植被的生长。2003 年黑龙江省出现了洪水灾害,植被生长受到自然要素和环境因素的影响,导致 NDVI 值减小。2004—2014 年植被生长逐渐呈向好态势,整体水平逐渐有了生机勃勃的状态,尤其从 2012 年开始,植被大面积恢复生长并呈现增长趋势。产生这种现象的主要原因与复杂多样的地势形态有关:黑龙江省西部和东部地区分布着较多的沼泽和栽培植被;中部地区为松嫩平原,水系分布紧密,有利于人类的居住和城市化发展,主要城镇分布于此,导致地区部分植被覆盖率较低;而东南部有较多山地,植被类型较为丰富,所以 NDVI 普遍偏高。

罗兰新等^[36]研究认为,水分对植被生长的限制较小,温度则成为影响植被生长的主要因子。由于黑龙江省属温带季风气候,降水与植被覆盖指数在空间上异质性较为明显。大部分地区平均气温较低冰雪覆盖时间长,植被休眠时期较长,降水主要集中于夏季,因此在分析降水量与 NDVI 关系变化时,要考虑多种要素。因为降水并不是影响植被生长的主要因素,所以黑龙江省中部林区即使降水较多,也并未导致 NDVI 增加。年均气温以升高趋势为主,而近大兴安岭北部小部分地区气温年变化率呈现降低趋势,对于气温变化,受春季气温上升影响阔叶林和沼泽植被的生长季时间延长。气温成为影响植被生长的主导因子,而人类活动可能导致中国农业区植被退化,自然灾害现象也影响该地区植被动态变化^[37-38]。

4 结 论

1982—2015 年黑龙江省植被覆盖变化整体呈缓慢增加的趋势,植被生长季 NDVI 上升趋势比年均 NDVI 上升趋势显著,年均及植被生长季 NDVI 的波动有很好的一致性。植被覆盖变化空间异质性明显,大部分 NDVI 变化范围在 ± 0.1 。如:植被覆

盖增加程度较高且 NDVI 大于 0.3 的一般位于大兴安岭地区;整体变化趋势不大且 NDVI 在 0~0.1 的多位于高海拔地区;NDVI 减少程度较为明显的位于三江平原的东南部地区和小兴安岭部分地区。不同土地利用类型的 NDVI 山区林地高,平原耕地、城市地区低。在植被生长季,耕地和草地的 NDVI 增长趋势显著,而林地 NDVI 出现轻微减小趋势。

对黑龙江省 1982—2015 年 NDVI 变化的未来趋势进行预测,植被覆盖指数未来变化趋势呈向好趋势的区域和不确定性的区域较多,在南部地区呈退化现象。NDVI 未来变化不确定区域集中分布在松嫩平原、中部地区以及三江平原南部地区。在不同时期,NDVI 未来变化趋势明显不同,空间差异性明显。主要由于地理位置和气候要素的改变,NDVI 未来变化趋势呈现出持续退化和持续改善的情况。

1982—2015 年黑龙江省 NDVI 与气温正相关性较弱,与降水负相关性弱,所以 NDVI 对气温的响应更为明显。相对于林地而言,城市自我调节能力较弱,因此位于城市的 NDVI 对气候因子的响应较大。黑龙江省西南部城市地区的 NDVI 变化与气温和降水的变化有明显一致性。NDVI 与对气温和降水的响应空间异质性明显,尤其在植被生长季,其长势多受降水影响,而位于松嫩平原的缓化地区,植被覆盖变化受气温和降水的影响基本没有差异。

参考文献(References):

- [1] FIORE A M, NAIK V, SPRACKLEN D V, et al. Global air quality and climate[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(19): 6663-6683. DOI: 10.1039/c2cs35095e.
- [2] 姜欣彤,黎曙,周祖昊,等.基于高程分段的黄河源区 NDVI 和水热条件空间分布格局[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 39-53. (JIANG X T, LI S, ZHOU Z H, et al. Distribution pattern of NDVI and hydrothermal conditions in the Yellow River Headwaters based on elevation section[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(4): 39-53. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0071.
- [3] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. [J]. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756. DOI: 10.1038/nature08823.
- [4] 丁文荣.金沙江下段植被 NDVI 变化趋势及其归因[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 107-112. (DING W R. Study on the relationship between change trend of NDVI and environmental factors in the lower

- section of Jinsha River, China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(1):107-112. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 018.
- [5] DAVIS M B, SHAW R G. Range shifts and adaptive responses to quaternary climate change[J]. *Science*, 292(5517): 673-679. DOI: 10. 1126/science. 292. 5517. 673.
- [6] HINZMAN L D, BETTEZ N D, BOLTON W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic regions[J]. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 251-298. DOI: 10. 1007/s10584-005-5352-2.
- [7] TIETJEN B, SCHLAEPFER D R, BRADFORD J B, et al. Climate change-induced vegetation shifts lead to more ecological droughts despite projected rainfall increases in many global temperate drylands[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2743-2754. DOI: 10. 1111/gcb. 13598.
- [8] GUTMAN G G. Global data on land surface parameters from NOAA AVHRR for use in numerical climate models[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(5): 669-680. DOI: 10. 1175/1520-0442(1994)007<0669:gdolsp>2. 0. co;2.
- [9] PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510. DOI: 10. 1016/j. tree. 2005. 05. 011.
- [10] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51. DOI: 10. 1038/nature09364.
- [11] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293, 400. (ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982-2009[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 287-293, 400. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; NYGU. 0. 2011-04-053.
- [12] 孟庆博, 刘艳丽, 鞠琴, 等. 雅鲁藏布江流域近 18 年来植被变化及其对气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 539-550. (MENG Q B, LIU Y L, JU Q, et al. Vegetation change and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River basin in the past 18 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(3): 539-550. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0057.
- [13] 马梓策, 于红博, 曹聪明, 等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1310-1321. (MA Z C, YU H B, CAO C M, et al. Spatiotemporal characteristics of fractional vegetation coverage and its influencing factors in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1310-1321. (in Chinese) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj202006006.
- [14] 曹永强, 王菲. 河北省植被时空变化及其对气象干旱的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 708-719, 757. (CAO Y Q, WANG F. Spatial and temporal variation of vegetation and its response to meteorological drought in Hebei Province[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 708-719, 757. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0074.
- [15] 安佑志, 张远, 高炜, 等. 基于 GIMMS NDVI 数据的北方 13 省荒漠化趋势评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 1-7. (AN Y Z, ZHANG Y, GAO W, et al. Assessment of desertification trends of 13 provinces in northern China based on GIMMS NDVI data [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(4): 1-7. (in Chinese) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2014. 04. 001.
- [16] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. *地球科学进展*, 2002(2): 254-261. (LI X B, CHEN Y H, ZHANG Y X, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China[J]. *Advances in Earth Science*, 2002(2): 254-261. (in Chinese)).
- [17] 杨倩, 刘登峰, 孟宪萌, 等. 汉江上游植被指数变化及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 138-148. (YANG Q, LIU D F, MENG X M, et al. Vegetation index change in the upper reaches of Han River and its attribution analysis[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 138-148. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0094.
- [18] YUAN F, REN L L, YU Z B, et al. Potential natural vegetation dynamics driven by future long-term climate change and its hydrological impacts in the Hanjiang River basin, China [J]. *Hydrology Research*, 2012, 43(1-2): 73-90. DOI: 10. 2166/nh. 2011. 111.
- [19] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543. (GAO J B, JIAO K W, WU S H, et al. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity

- ty of NDVI in China during 1982-2013[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534-543. (in Chinese) DOI: 10. 11821/dlxb201903010.
- [20] 刘少华,严登华,史晓亮,等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 480-489. (LIU S H, YAN D H, SHI X L, et al. Inter-annual variability of vegetation NDVI, accumulated temperature and precipitation and their correlations in China[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 480-489. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2014. 03. 008.
- [21] 杜加强,舒俭民,赵晨曦,等. 两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析:以新疆地区为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6738-6749. (DU J Q, SHU J M, ZHAO C X, et al. Comparison of GIMMS NDVI3g and GIMMS NDVIg for monitoring vegetation activity and its responses to climate changes in Xinjiang during 1982-2006[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6738-6749. (in Chinese)) DOI: 10. 5846 / stxb201504190805.
- [22] 王涛,赵元真,王慧,等. 基于 GIMMS NDVI 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 Z Y, 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. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2020. 0055.
- [23] 周玉科. 中国东北地区植被生产力控制因素分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(01): 53-67. (ZHOU Y K. Analysis of controlling factors for vegetation productivity in northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 53-67. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb202001005.
- [24] JIANG N, ZHU W Q, ZHENG Z T, et al. A comparative analysis between GIMSS NDVIg and NDVI3g for monitoring vegetation activity change in the northern Hemisphere during 1982-2008[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 4031-4044. DOI: 10. 3390/rs5084031.
- [25] 于璐,武志涛,杜自强,等. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2007-2014. (YU L, WU Z T, DU Z Q, et al. Quantitative analysis of the effects of human activities on vegetation in the Beijing-Tianjin sandstorm source region under the climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2007-2014. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 202006. 005.
- [26] 金凯,王飞,韩剑桥,等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974. (JIN K, WANG F, HAN J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb202005006.
- [27] 何航,张勃,侯启,等. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80. (HE H, ZHANG B, HOU Q, et al. Variation characteristic of NDVI and its response to climate change in northern China from 1982 to 2015[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 70-80. (in Chinese)) DOI: 10. 19741/j. issn. 1673-4831. 2019. 0115.
- [28] ZHAO J J, WANG Y Y, ZHANG Z X, et al. The variations of land surface phenology in northeast China and its responses to climate change from 1982 to 2013[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 400. DOI: 10. 3390/rs8050400.
- [29] 王子龙,刘莹,姜秋香,等. 黑龙江省参考作物蒸散量变化及气象因子分析[J]. *水利水运工程学报*, 2021(2): 46-56. (WANG Z L, LIU Y, JIANG Q X, et al. Analysis of reference crop evapotranspiration changes and meteorological factors in Heilongjiang Province[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(2): 46-56. (in Chinese)) DOI: 10. 12170/20200831003.
- [30] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764. (MU S J, LI J L, ZHOU W, et al. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3752-3764. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201205030638.
- [31] 蔡博峰,于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186. (CAI B F, YU R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2009, 13(6): 1170-1186. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-4619. 2009. 06. 014.
- [32] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004(2): 177-182. (JIANG T H, DENG L T. Some problems in estimating a Hurst exponent: A case study of applicatings to climatic change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004(2): 177-182. (in Chinese)) DOI: 10.

- 3969/j. issn. 1000-0690. 2004. 02. 008.
- [33] 徐嘉昕,房世波,张廷斌,等. 2000—2016 年三江源区植被生长季 NDVI 变化及其对气候因子的响应[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 237-246. (XU J X, FANG S B, ZHANG T B, et al. NDVI changes and its correlation with climate factors of the Three River Headwater region in growing seasons during 2000-2016 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2020, 32(1): 237-246. (in Chinese)) DOI: 10. 6046 / gtzyyg. 2020. 01. 32.
- [34] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2016. 07. 001.
- [35] 国志兴,张晓宁,王宗明,等. 东北地区植被物候对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 578-585. (GUO Z X, ZHANG X N, WANG Z M, et al. Responses of vegetation phenology in northeast China to climate change [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 578-585. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/ j. 1000-4890. 2010. 0084.
- [36] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/ j. 1000-4890. 202002. 025.
- [37] VICENTE-SERRANO S M, VAN DER SCHRIER G, BEGUERÍ A S, et al. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 42-54. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 11. 025.
- [38] TOUMA D, ASHFAQ M, NAYAK M A, et al. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century [J]. Journal of Hydrology, 2014, 259: 196-207. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 12. 011.

Spatiotemporal variation of vegetation index and its response to climate factors in Heilongjiang Province

WANG Zilong, SUN Changhong, LIU Ying, JIANG Qiuxiang, ZHU Tong

(School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of cover change in Heilongjiang Province under global warming. The spatiotemporal changes and future trends of vegetation cover in Heilongjiang Province in recent 34 years were analyzed based on GIMMS NDVI3G data from 1982 to 2015. At the same time, the correlation between vegetation cover and temperature, precipitation and evapotranspiration were analyzed based on the data of 34 meteorological stations in the province. Research results can provide theoretical support for the study of land-use/cover change in cold regions under the background of climate change.

Research methods were trend analysis, Hurst index method and correlation analysis method. Trend analysis method used linear regression analysis to calculate the time-varying variables to determine the significance of the interannual changes in variables, and then used slope to reflect its changing trend. Hurst index method was based on current trends and the range of H value to analyze whether future trends of NDVI was consistent with the current, so as to predict the future trends of NDVI. Correlation analysis method was based on Pearson correlation coefficient to analyze correlations of NDVI with precipitation, mean temperature and evapotranspiration, to study climatic factors influence on NDVI.

The results showed that: During 34 years, the three types of planting coverage in Heilongjiang Province all showed a slow upward trend. The growth rate of NDVI in woodland and grassland was 0.004/10 a, and that in farmland was 0.002/10 a. The overall change of vegetation cover increased first and then decreased, with the maximum value appearing in 2014 and the minimum value appearing in 1984. The vegetation cover in Heilongjiang Province is high in the east and low in the west. Taking "Daxing'an mountains-Yichun-Hegang-Jiamusi-Shuangyashan" as the boundary, the vegetation coverage is relatively rich in the southwest, while less in the northeast. The same feature of vegetation change in Heilongjiang Province is stronger than the opposite feature, and areas showed persistence and anti-persistence accounted for 97.65% and 2.35% of total area, respectively. In Heilongjiang Province, the correlation between vegetation cover change and air temperature is higher than that of precipitation, and the correlation between evapotranspiration and vegetation index is significantly different in annual and growing seasons. The average temperature is the main meteorological factor affecting vegetation cover change in the growing season.

The overall vegetation cover change in Heilongjiang Province showed a slow increasing trend from 1982 to 2015. The rising trend of NDVI in growing season was more obvious than that in annual average, and there was a good consistency in fluctuation

of NDVI between annual average and growing season. The spatial heterogeneity of vegetation cover change was obvious, and most NDVI changes were within ± 0.1 . Vegetation coverage in Daxing'an mountains increased to a high degree; Vegetation cover change is not obvious in high altitude areas; Reduction of NDVI in the southeast of Sanjiang Plain and some areas of Xiaoxing'an mountains is obvious. In different land use types, woodland in mountainous areas is higher than that in plain farmland and urban areas. During the growing season, NDVI in cropland and grassland showed a significant increasing trend, while NDVI in woodland showed a slight decreasing trend. According to the prediction of the future trend of NDVI change, there were many areas where the future change trend of vegetation cover index showed a good trend, and there were also many areas where the future change was uncertain, and vegetation cover index showed a degeneration phenomenon in the southern region. Regions of uncertain about NDVI future changes were mainly distributed in Songnen Plain, central Region and southern Sanjiang Plain of Heilongjiang Province. In different periods, NDVI future variation trend was obviously different, and the spatial variability was obvious. NDVI future variation trend showed continuous degradation and continuous improvement mainly due to changes in geographic location and climate factors. The positive correlation between NDVI and temperature was weak, and the negative correlation between NDVI and precipitation was weaker, so NDVI response to air temperature is more pronounced. Compared with forest land, cities had weaker self-regulation ability, so NDVI located in cities was more responsive to climate factors. NDVI changes were significantly consistent with changes in air temperature and precipitation in the southwestern urban areas of Heilongjiang Province. About NDVI response to temperature and precipitation, spatial heterogeneity was obvious. Especially in the vegetation growing season, its growth was mostly influenced by precipitation. However, in the Suihua area of Songnen Plain, there was no obvious difference in vegetation cover change affected by temperature and precipitation.

Key words: vegetation cover; GIMMS NDVI3g; climate response; Hurst index; correlation analysis

(上接第 669 页)

of each region from 2008 to 2019. The combined weight model of AHP-entropy based on least square method is adopted to determine the weight of each indicator. It uses "SMI-P" evaluation method to evaluate the harmonious development level of resource-ecology-economy system. The "SMI-P" method is further combined with the coupling coordination model to comprehensively appraise the coupling coordination relation of resource-ecology-economy system in the study area. The results show that between 2008 and 2019; The harmonious development level of the fifteen prefecture-level administrative regions shows a trend of fluctuating growth on the whole, but none of them reached the "harmony" stage, and among them, Zhengzhou is the best (0.68), and Puyang is the worst (0.51); The coupling coordination relation of the fifteen prefecture-level administrative regions is gradually gathering to the stage of high-quality coordination, but most of them are still in the intermediate and good coordination stage, and the coordinated development speed of Puyang is relatively backward among them.

Key words: resources-ecology-economy; SMI-P; harmonious development; coupling coordination; the Henan section of the Yellow River