

DOI: 10.12401/j.nwg.2022026

大凌河流域 1998~2019 年 NDVI 时空变化及其对气温和降水的响应

江山, 石绍山, 郭常来, 冯雨林, 孙家全, 孙秀波, 周丽*

(中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 利用 9 个国家气象站数据和 1998~2019 年 SPOT/VEGETATION NDVI 数据, 运用趋势分析、偏相关分析和复相关分析方法, 研究大凌河流域 22 年来 NDVI 时空演变规律及其与气温和降水之间的关系。研究发现: ① 研究区 22 年来植被覆盖整体变好, 90.8% 的区域 NDVI 呈增加趋势, 不同季节变化趋势各异, 夏季 NDVI 增长率最高, 春季最低。② 大凌河上游地区 NDVI 总体呈缓慢稳定增长状态, 中下游地区增长与减退并存; ③ 研究区 NDVI 总体与气温呈负相关、与降水量呈正相关, 且 NDVI 与年降水量关系更密切。④ 研究区植被覆盖降水驱动型占总面积的 4.33%, 气温驱动型占比为 0.03%, 降水、气温共同驱动型占比为 2.73%。

关键词: 大凌河流域; NDVI; 时空变化; 气候因子; 相关分析; 东北地区

中图分类号: P407.8; X87

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0254-09

NDVI Changes of the Daling River Basin in Growing Seasons During 1998~2019 and Its Correlation with Temperature and Precipitation

JIANG Shan, SHI Shaoshan, GUO Changlai, FENG Yulin, SUN Jiaquan, SUN Xiubo, ZHOU Li*

(Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China)

Abstract: Based on the data of 9 national meteorological stations and SPOT/VEGETATION NDVI data from 1998 to 2019, In this paper, trend analysis, partial correlation analysis and complex correlation analysis were used to study the temporal and spatial evolution of NDVI and its relationship with air temperature and precipitation in the Daling river basin in the past 22 years, and the following conclusions were drawn: ① The overall vegetation coverage in the study area improved in the past 22 years, and NDVI increased in 90.8% of the area, with different trends in different seasons. The growth rate of NDVI was the highest in summer and the lowest in spring. ② In the upper reaches of Daling River, NDVI increased slowly and steadily, while in the middle and lower reaches, NDVI increased and decreased simultaneously. ③ In the study area, NDVI was negatively correlated with air temperature but positively correlated with precipitation, and the relationship between NDVI and annual precipitation was closer. ④ In the study area, 4.33% of the total area was driven by precipitation, 0.03% by air temperature, and 2.73% by precipitation and air temperature.

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-08-05; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“东北振兴区资源环境承载能力监测”(DD20221730), “东北地区自然资源综合调查”(DD20211383)联合资助。

作者简介: 江山(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事遥感地质调查工作。E-mail: jiangshan85@qq.com。

* 通讯作者: 周丽(1984-), 女, 硕士, 从事期刊编辑、科技英语翻译等工作。E-mail: 270428690@qq.com。

Keywords: Daling river basin; NDVI; space-time change; climate factor; correlation analysis; Northeast China

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在地表能量交换、水平衡和生物循环等方面发挥重要作用。植被对温度、降水等气候因子尤为敏感,被称为气候变化“指示器”,是研究生态系统脆弱程度和全球变化的重要内容(李晓兵等,2000;马明国等,2006)。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够较好地反映植被覆盖度和长势,被广泛应用于不同时空尺度的植被生长监测中,用于探讨植被与气候因子之间的关系(朴世龙等,2001;杨元合等,2006;尤南山等,2019;杜臻等,2023;黄煜等,2023;王化齐等,2023)。

陈云浩等(2001)根据中国植被覆盖与气候因子驱动的区域分异规律,将植被区共划分4个一级区、6个二级区和14个三级区。Wardlow等(2008)研究了美国中部大平原密集种植区植被覆盖与环境条件之间的关系,为农业管理提供科学支持。崔林丽等(2010)分析了中国东部 NDVI 与气温和降水的响应特征,表明植被 NDVI 与气温和降水的最大相关系数在中国东部由北向南逐渐减小。袁丽华等(2013)分析黄河流域 NDVI 时空变化趋势和 Hurst 指数特征,研究植被覆盖变化的可持续特征。武正丽等(2015)基于 MODIS NDVI 等数据研究了祁连山地区植被覆盖变化与气候因子的响应关系。孟丹等(2015)通过分析 2001~2013 年间京津冀地区 NDVI 数据与降水、气温资料之间的相关关系,表明该区域植被覆盖变化主要受非气候因子驱动,面积占比为 89.63%。徐嘉昕等(2020)分析了三江源区 17 年来 NDVI 时空分布特征及其与气温和降水之间的关系,表明植被生长季初期气温对 NDVI 变化的影响大于降水量,但在生长季中期,降水量对部分类型植被的生长影响较大。

大凌河流域属辽西生态环境脆弱区,流域内山高谷深、地形复杂,受人为与自然因素影响,石漠化、水土流失等问题突出。生态系统稳定直接关系着辽西的经济发展和沿河居民生活(邸志强等,2007;王炜航等,2010),前人对该区植被覆盖与气候之间的关系研究较少,且数据陈旧。鉴于此,笔者以大凌河流域为研究区,基于 GIS 等平台分析最近 20 年间流域 NDVI 的时空演变特征,研究了植被变化与降水和温度等气候条件之间的响应关系,为流域生态环境保护与修复

提供了科学依据(强建华等,2021;王鹏等,2021)。

1 数据与方法

1.1 研究区简介

大凌河全长为 435 km,上游分南、北两支,于喀左县大城子东南汇合后,流经朝阳、北漂、凌海、义县等地,最终汇入渤海。大凌河流域地理范围为: E 118°53'~121°52'、N 40°28'~42°38',流域总面积为 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。该流域地貌类型以山地丘陵为主,少量平原区;气候类型属于中温带气候,四季冷暖干湿分明,温度变化较大。该流域多年平均气温为 $8.3 \text{ }^\circ\text{C}$,平均相对湿度为 53%,日照时数为 2 800 h,年均降雨量为 465 mm,年蒸发量为 1 974.4 mm,年均径流量为 $1.79 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

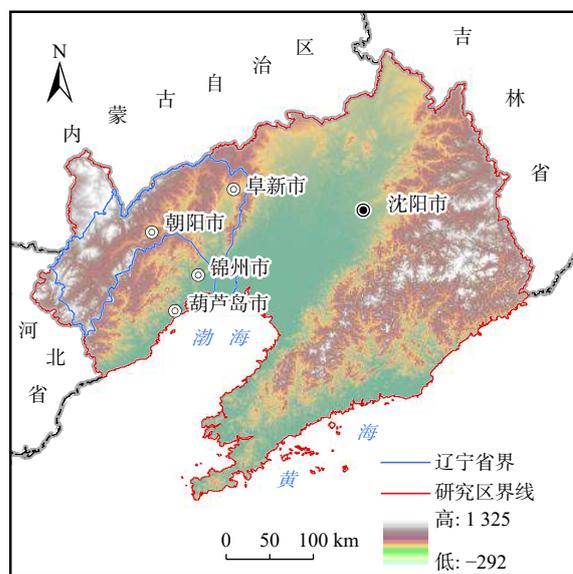


图 1 大凌河流域地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of Daling river basin

1.2 数据来源及预处理

NDVI 数据来自中国科学院资源环境科学数据中心发布的中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集(<http://www.resdc.cn/DOI>),该数据是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成的。数据获取时间为 1998~2019 年,数据格式为 ARCGIS GRID 格式,空间分辨率为 1 km。

气象数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。研究区内共有建昌站、喀左站、凌源站、建平站、朝阳站、北票站、阜新站、义县站和凌海站等9个国家气象站点,选取各气象站点1998~2019年每日降水和气温数据,采用平滑样条函数进行插值生成1 km分辨率栅格数据。本研究中地理数据处理与分析采用ArcGIS和Anusplin等软件完成。

1.3 研究方法

1.3.1 最大值合成法

最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC)是国际通用的NDVI数据统计方法。通过最大值合成法可以消除大气污染、云、太阳高度角等因素的干扰(陈云浩等,2001;王强等,2017)。本研究选取了大凌河流域1998~2019年期间每年3~11月的NDVI值,取每月2期数据的平均值为该月植被指数数据,再通过最大值合成法,提取每个像元的最大值为该年NDVI值,计算公式为:

$$NDVI_i = \text{Max}(NDVI_{ij}) \quad (1)$$

式中: $NDVI_i$ 表示第 i 年的 NDVI 值; i 取值 1~22, 分别代表 1998~2019 年; $NDVI_{ij}$ 表示第 i 年第 j 月的 NDVI 值; j 取值 1~9, 分别代表 3~11 月。

1.3.2 变异系数

变异系数(Coefficient of Variance, CV),又称为标准离差率或单位风险,是衡量资料中各观测值变异程度的一个统计量,计算公式为:

$$CV = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ 为样本标准差, μ 为样本的平均值。

1.3.3 趋势分析

为反映植被变化的年际和年内特征,采用生长季(3~11月)、春季(3~5月)、夏季(6~8月)和秋季(9~11月)NDVI合成值来表征植被生长,各季节分别为时段内各月份NDVI的平均值。笔者基于像元尺度,计算NDVI与年份的一元线性回归斜率 $slop$ (式3)。若 $slop > 0$ 表示NDVI呈增加趋势, $slop < 0$ 则表示NDVI呈减少趋势。结合回归系数的显著性水平(p 值),将研究区NDVI年际变化情况划分为6个类型:极显著降低($p < 0.01$, $slop < 0$)、显著降低($0.01 < p < 0.05$, $slop < 0$)、不显著降低($p > 0.05$, $slop < 0$)、不显著增加($p > 0.05$, $slop > 0$)、显著增加($0.01 < p < 0.05$, $slop > 0$)和极显著增加($p > 0.01$, $slop > 0$)(尤南山等,2019;张新悦等,2021)。

$slop$ 计算公式为:

$$slop = \frac{n * \sum_{i=1}^n i * NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n * \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为监测时间段的年数 22, $NDVI_i$ 表示第 i 年的植被指数。

1.3.4 偏相关分析

偏相关分析是在消除其他变量影响的前提下计算某两个变量之间的相关性,笔者利用基于像元的偏相关分析法分别研究了气温和降水量对植被NDVI变化的贡献程度,计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: R_{xyz} 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数。 R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别为变量 x 和 y 、变量 x 和 z 、变量 y 和 z 的皮尔逊相关系数。若 $R_{xy,z} > 0$, 表示正相关;若 $R_{xy,z} < 0$, 则表示负相关。偏相关系数越大,说明二者相关性越强。偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法完成。

偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法完成,计算公式如下:

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (5)$$

式中: n 为样本数(时间序列 1998~2019, 即 $n=22$), m 为自变量的数量。

1.3.5 复相关分析

复相关分析可研究一个变量与多个变量之间的相关程度,复相关的显著性检验可采用 F 检验法。复相关系数计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \quad (6)$$

复相关的显著性检验可采用 F 检验法,计算公式如下:

$$F = \frac{R_{x,yz}^2}{1 - R_{x,yz}^2} \times \frac{n - k - 1}{k} \quad (7)$$

式中: n 为时间序列年份数, k 为自变量的数量。

2 结果分析

2.1 区域尺度 NDVI 年际动态变化特征

从区域尺度看,1998~2019年间大凌河流域多年平均NDVI值为0.49,总体呈显著上升趋势($R^2=0.48$, $p < 0.01$),其NDVI值从1998年的平均0.49增至2019

年以来的 0.52, 年平均增长量为 0.001 4(图 2)。

按照不同季节来看, 1998~2019 年间大凌河流域在春季、夏季、秋季的 NDVI 均值分别为 0.362、0.739 和 0.642, 整体呈缓慢增长趋势。其中, 夏季 NDVI 增

长率最大, 为 0.005 9; 秋季(0.004 1)次之, 春季(0.003 4)最小。春季变异系数最大(0.135), 其次为夏季(0.065), 秋季最小(0.090), 说明春季植被覆盖的波动性最明显(图 3)。

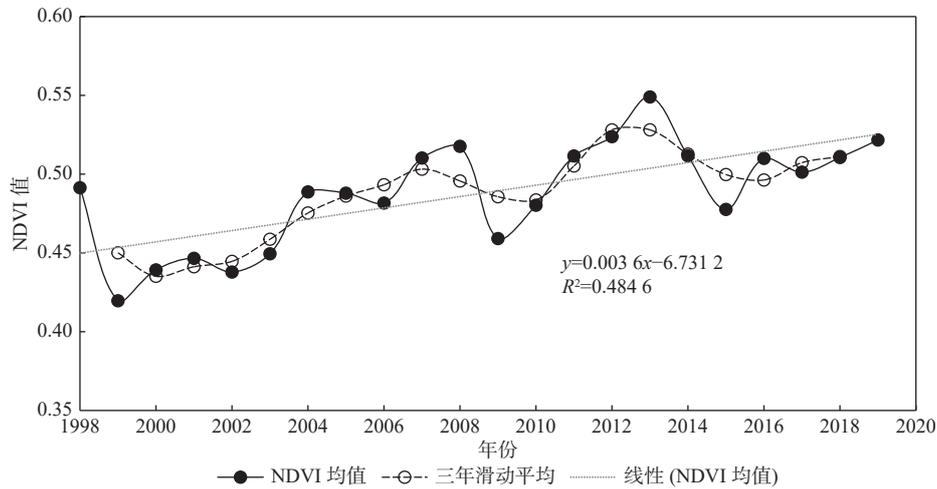


图 2 1998~2019 年大凌河流域生长季 NDVI 值变化趋势图

Fig. 2 NDVI variation trend during the growing season of Daling river basin from 1998 to 2019

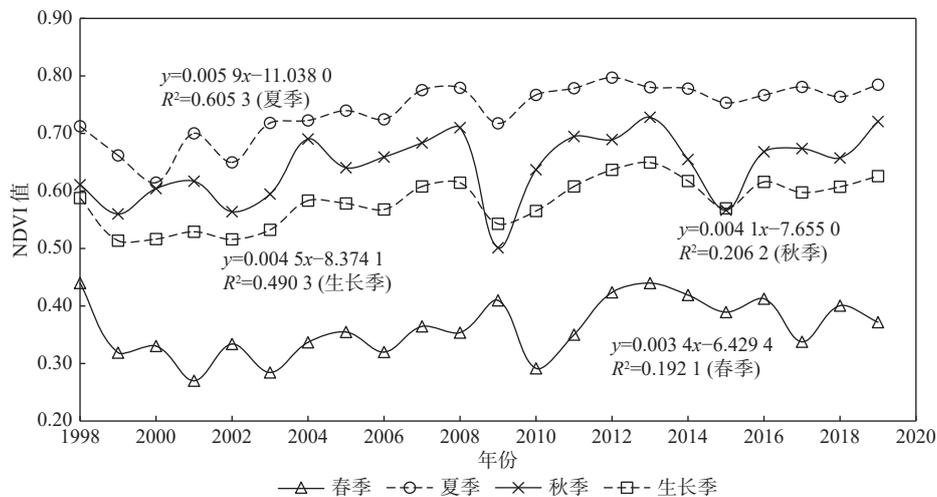


图 3 1998~2019 年大凌河流域 NDVI 值按季节变化趋势图

Fig. 3 Seasonal variation trend of NDVI in Daling river basin from 1998 to 2019

2.2 像元尺度的 NDVI 动态变化

1998~2019 年间, 大凌河流域逐像元 NDVI 值在不同季节的变化趋势见图 4 和图 5。

2.2.1 生长季

大凌河流域 22 年来生长季 92.8% 的区域 NDVI 值呈正增长, 其中, 增长率大于 0.005 的面积占总面积的 46.8%, 主要分布于大凌河中上游。NDVI 值增长率位于 0.003~0.005、0.001~0.003 两个区间的面积比例分别为 23.7%、16.3%, 主要分布于阜新市以南至锦州

市一带, 朝阳县、建平县和建昌县有零星分布。此外, 阜新市东北部、锦州市南部、朝阳市西部等地, NDVI 呈现局部斑块状缓慢负增长, 增长率绝对值 < 0.001(图 4, 表 1)。从 NDVI 变化显著性来看, 生长季 NDVI 以增加趋势为主, 面积占比 90.8%。其中, 不显著增加区域占比为 71.2%, 主要分布于大凌河流域中上游地区, 极显著增加和显著增加区域分别占 18.0% 和 1.6%, 主要分布于大凌河中下游的朝阳市、锦州市和阜新市等地(图 5, 表 2)。

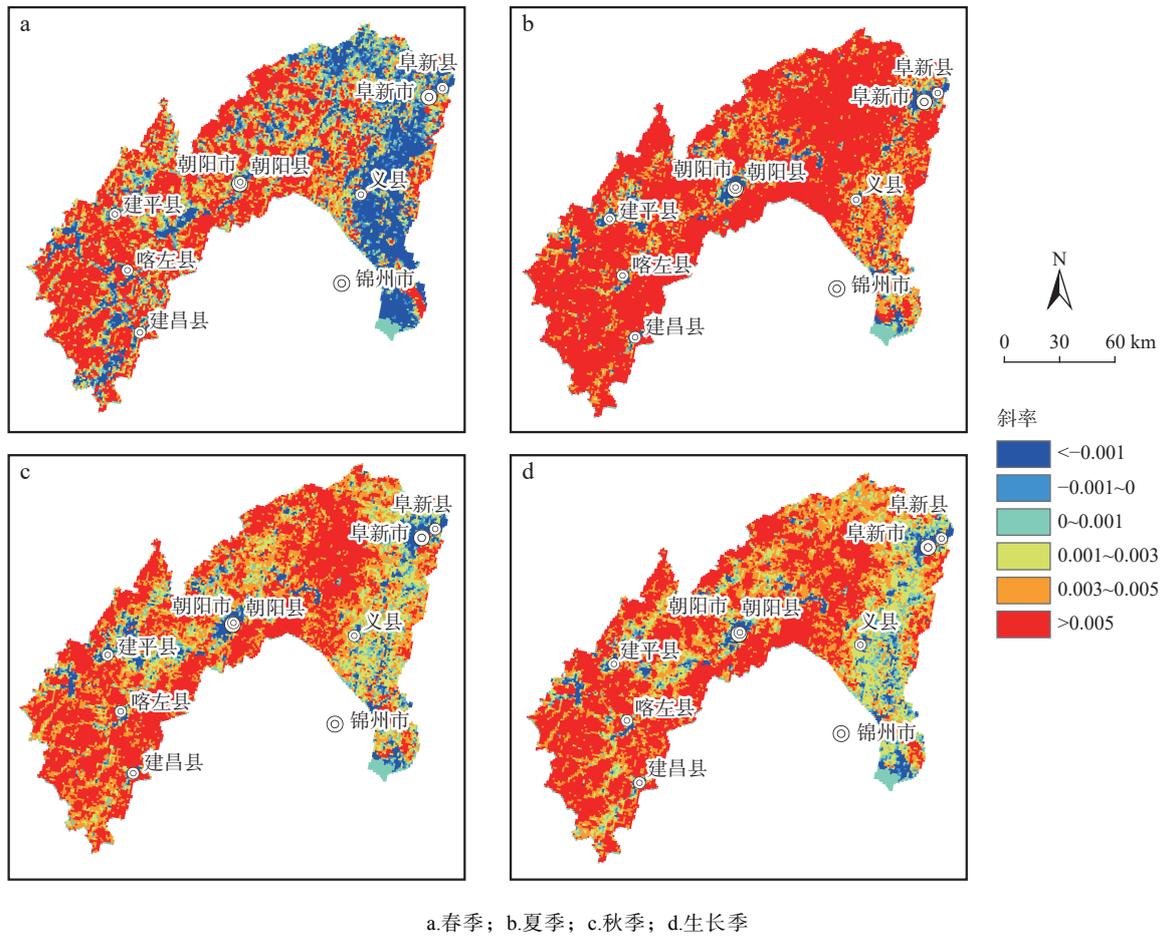


图 4 大凌河流域 1998~2019 年逐像元 NDVI 值变化趋势图

Fig. 4 NDVI variation trend per pixel in Daling river basin from 1998 to 2019

表 1 大凌河流域 1998~2019 年间 NDVI 变化趋势表

Tab. 1 NDVI variation trend in Daling river basin from 1998 to 2019

变化率	春季(%)	夏季(%)	秋季(%)	生长季(%)
<math><-0.001</math>	18.5	4.2	6.2	4.8
$-0.001\sim 0$	6.4	1.2	2.8	2.6
$0\sim 0.001$	8.1	2.8	5.4	5.8
$0.001\sim 0.003$	14.3	6.2	16.0	16.3
$0.003\sim 0.005$	14.8	15.4	25.0	23.7
>0.005	37.9	70.3	44.7	46.8

2.2.2 各季节

不同季节, NDVI 变化规律存在一定差异。从 NDVI 增长率来看, 不同季节超过六成的区域 NDVI 变化率大于 0.001, 尤其是夏季, 这一比例为 91.9%。另有部分区域 NDVI 呈缓慢负增长, 春季负增长区最大, 占总面积 24.9%, 秋季占比 9.0%, 夏季最小(占比

5.4%)(图 4, 表 1)。从 NDVI 变化的显著性来看, 秋季极显著增加区面积占比达 40.2%, 为所有季节中最高, 主要分布于朝阳市东北部、阜新—锦州一带。春季极显著增加区面积占比 28.6%, 最低的是夏季, 这一比例为 9.8%。显著增加区, 秋季面积最大, 占比为 19.3%。极显著降低区中, 比例最大的是春季, 为 18.2%, 主要集中在大凌河下游阜新—锦州一带, 建平、喀左等局部有零星分布(图 5, 表 2)。

2.3 NDVI 与气温、降水量等因素之间的响应关系

对大凌河流域 22 年来生长季 NDVI 与年降水量和平均气温进行偏相关性分析(图 6、图 7)。结果显示, 生长季 NDVI 与气温和降水的评价偏相关系数, 分别为 -0.24、0.32, 表明年际变化水平上, 大凌河流域 NDVI 与气温呈负相关、与降水量呈正相关, 且 NDVI 与年降水量关系更密切。研究区域内 NDVI 与平均气温呈正、负相关的区域分别占总区域的 5.40%、94.60%, 对偏相关系数进行显著性检验, 可知 0.02% 的区域通过 $p < 0.01$ 的显著性检验, 主

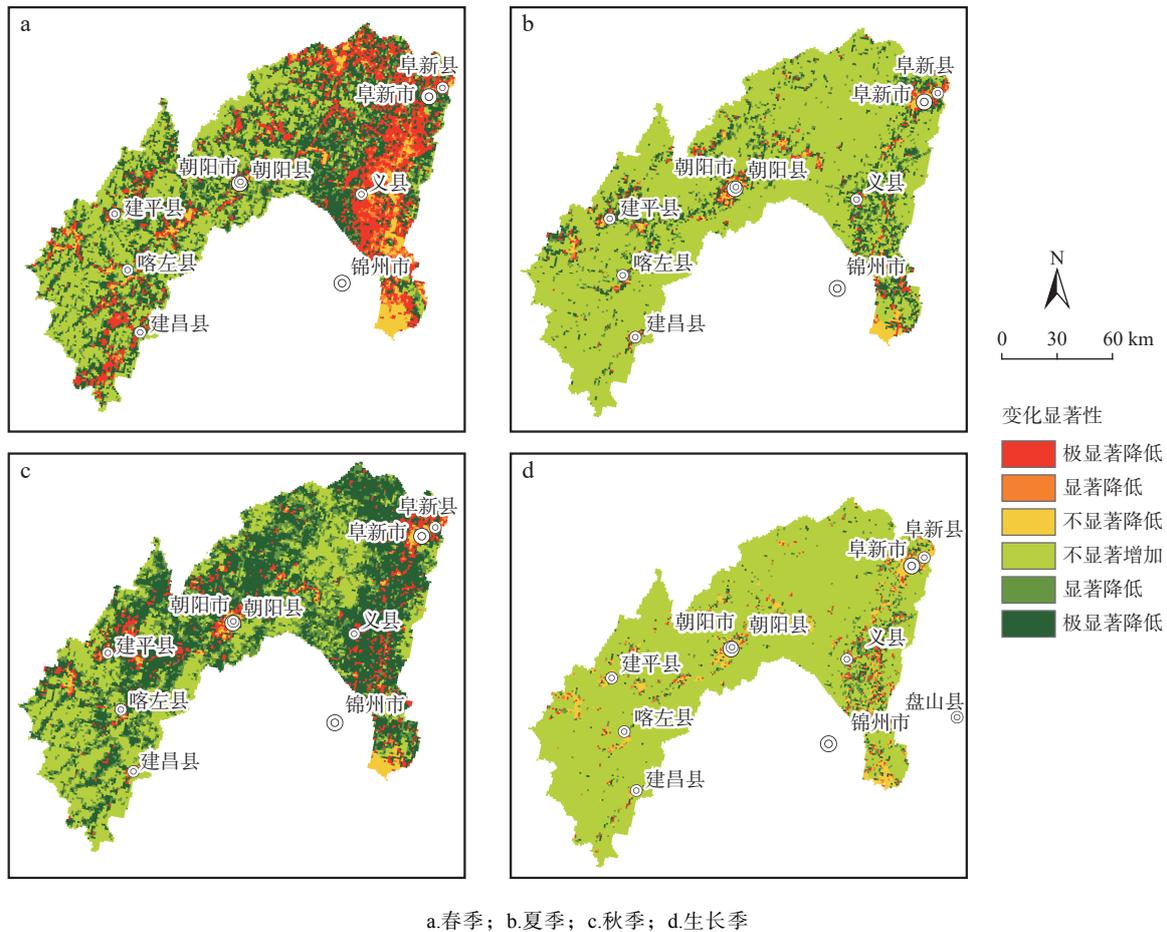


图 5 大凌河流域 1998~2019 年逐像元 NDVI 值变化趋势的显著性图

Fig. 5 Significance of NDVI trend per pixel in Daling river basin from 1998 to 2019

表 2 大凌河流域 1998~2019 年间 NDVI 变化的显著性表

Tab. 2 Significance of NDVI change in Daling river basin from 1998 to 2019

变化显著性	春季 (%)	夏季 (%)	秋季 (%)	生长季 (%)
极显著降低	18.2	3.1	6.6	4.3
显著降低	3.3	0.7	0.8	0.1
不显著降低	4.1	2.1	2.1	4.8
不显著增加	33.3	76.9	31.0	71.2
显著增加	12.6	7.5	19.3	1.6
极显著增加	28.6	9.8	40.2	18.0

要分布在大凌河口。研究区域内 NDVI 与降水量呈正、负相关的区域, 分别占总区域的 97.36%、2.64%, 其中通过 $p < 0.01$ 显著性检验区域比例为 4.40%, 主要分布于阜新—义县一带, 朝阳和建平等地有零星分布。

大凌河流域生长季 NDVI 与气温、降水复相关系数为 0~0.90(图 8), 平均复相关系数为 0.38, 高值主要集中在阜新县—义县一带, 以及朝阳县和建平县部

分区域, 低值区分布较广, 主要分布于大凌河中上游。根据表 3 确立的分区规则(王强等, 2017), 统计大凌河流域降水驱动型区域占比为 4.33%, 主要分布在阜新县、朝阳市等地区, 还有部分零星分布在建平县和义县; 气温驱动型区域所占面积比为 0.03%, 主要分布锦州市大凌河入海口; 降水、气温共同驱动区域占总面积的 2.73%, 主要分布在阜新市周边, 其他县市均有零星分布。

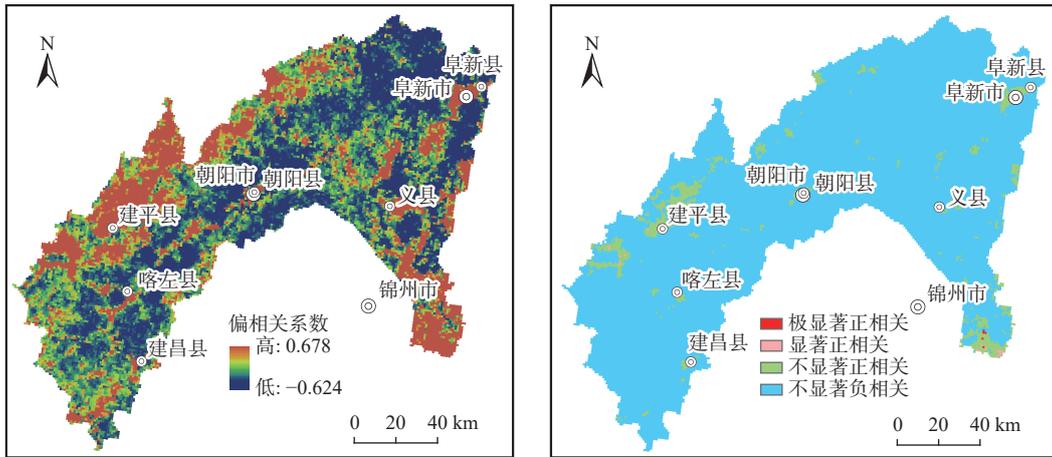


图 6 大凌河流域生长季 NDVI 与气温的偏相关关系图

Fig. 6 Partial correlation between NDVI and air temperature in the growing season of Daling river basin

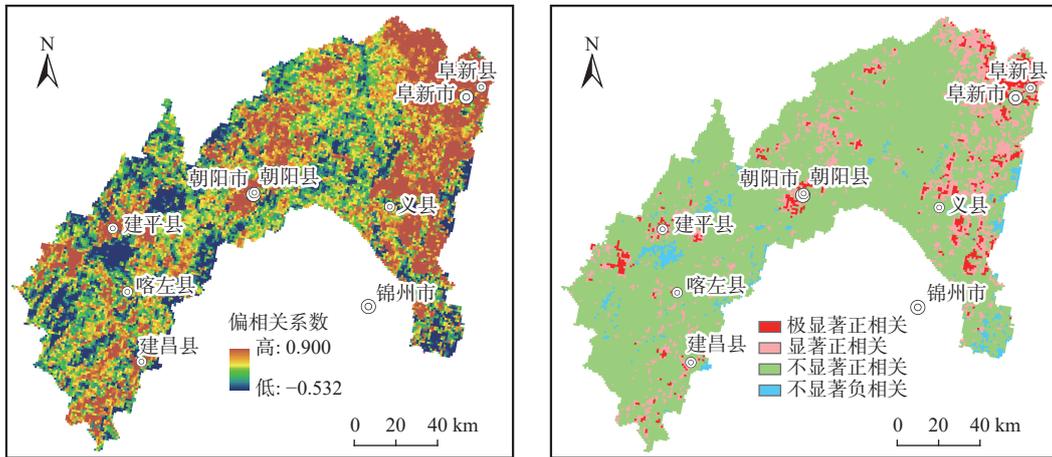
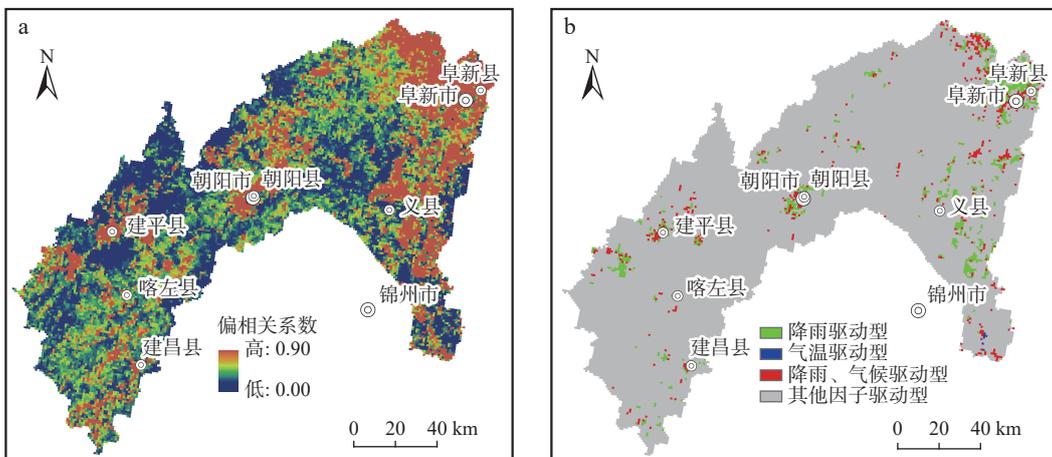


图 7 大凌河流域生长季 NDVI 与降水量的偏相关关系图

Fig. 7 Partial correlation between NDVI and precipitation in the growing season of Daling river basin



a. 偏相关系数; b. 不同驱动因子分区

图 8 生长季 NDVI 气温、降水量的复相关系数(a)与不同驱动因子分区图(b)

Fig. 8 (a) Multiple correlation coefficients between NDVI and temperature and (b) precipitation and partitioning of different driving factors in growing season

表3 大凌河流域植被覆盖驱动分区规则表

Tab. 3 Vegetation cover driving zoning criteria in the Daling river basin

NDVI变化类型	分区准则			面积占比(%)
	$r_{NDVI,P,T}$	$r_{NDVI,T,P}$	$R_{NDVI,TP}$	
降水驱动型	$t > t_{0.01}$		$F > F_{0.05}$	4.33
气温驱动型		$t > t_{0.01}$	$F > F_{0.05}$	0.03
气温、降水驱动型	$t < t_{0.01}$	$t < t_{0.01}$	$F > F_{0.05}$	2.73
其他因子驱动型			$F < F_{0.05}$	92.91

注: 表中 $r_{NDVI,P,T}$ 、 $r_{NDVI,T,P}$ 分别为NDVI与降水、气温的偏相关系数, $R_{NDVI,TP}$ 则表示NDVI与气温和降水的复相关系数, t 和 F 分别为 t 、 F 检验的统计量, $t_{0.01}$ 表示 t 检验的0.01显著性水平, $F_{0.05}$ 表示 F 检验的0.05显著性水平。

3 讨论与结论

(1)1998~2019年,大凌河流域NDVI整体呈增加趋势,说明植被覆盖整体变好。不同季节变化趋势各异,夏季NDVI增长率最高,秋季次之,春季增长率最低,且波动最明显。

(2)大凌河流域植被覆盖空间上呈现不同特征,中上游NDVI增长率较大,变化显著性以不显著为主,说明呈缓慢稳定增长规律。下游地区NDVI增长率整体较小,但变化显著性方面存在多种情况,特别是极显著增加和极显著降低区相邻共存。究其原因,大凌河流域上游以丘陵山区为主,自然资源开发程度较低;下游地区由于人类活动更频繁,对植被的破坏和修复同时进行,造成更复杂的植被覆盖变化规律。

(3)大凌河流域NDVI总体与平均气温呈负相关、与降水量呈正相关,且NDVI与年降水量关系更密切。区内94.60%的区域NDVI与平均气温呈负相关,其中通过显著性检验($p < 0.01$)的比例为0.02%,主要分布于大凌河口。区内97.36%的区域NDVI与降水量呈正相关的区域,占总区域的,通过 $p < 0.01$ 显著性检验区域比例为4.40%,主要分布于阜新—义县一带。

(4)根据前人研究中气候因子驱动评价模型,大凌河流域植被覆盖降水驱动型区域占比为4.33%,主要分布在阜新县、朝阳市等地区;气温驱动型所占面积比为0.03%,主要分布锦州市大凌河入海口;降水、气温共同驱动区域占总面积的2.73%,主要分布在阜新市周边。

参考文献(References):

- 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983-1992年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
- CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun. Variation in NDVI driven by climate factors across China, 1983-1992[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(6): 716-720.
- 崔林丽, 史军, 肖风劲, 等. 中国东部NDVI的变化趋势及其与气候因子的相关分析[J]. 资源科学, 2010, 032(1): 124-131.
- CUI Linli, SHI Jun, XIAO Fengjin, et al. Variation Trends in Vegetation NDVI and Its Correlation with Climatic Factors in Eastern China[J]. Resources Science, 2010, 032(1): 124-131.
- 郎志强, 金洪涛, 苗英, 等. 辽西蓄水构造及找水方向[J]. 地质与资源, 2007, 16(2): 112-115.
- DI Zhiqiang, JIN Hongtao, MIAO Ying, et al. Water storage structure and water search target in western Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2007, 16(2): 112-115.
- 杜臻, 张茂省, 冯立, 等. 鄂尔多斯盆地煤炭采动的生态系统响应机制研究现状与展望[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 78-88.
- DU Zhen, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Research Status and Prospect of Ecosystem Response Mechanism to Coal Mining in Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 78-88.
- 黄煜, 谢婉丽, 刘琦琦, 等. 基于GIS与MaxEnt模型的滑坡易发性评价以铜川市中部城区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 266-275.
- HUANG Yu, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Landslide Susceptibility Assessment Based on GIS and MaxEnt Model: Example from Central Districts in Tongchuan City[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 266-275.
- 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型NDVI动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-382.
- LI Xiaobing, SHI Peijun. Sensitivity Analysis of Variation in NDVI, Temperature and Precipitation in Typical Vegetation Types across China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(3): 379-382.
- 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- MA Mingguo, WANG Jian, WANG Xuemei. Advance in the Inter-annual Variability of Vegetation and Its Relation to Climate Based on Remote Sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 421-431.
- 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 等. 京津冀地区NDVI变化及气候因子驱动分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(8): 1001-1007.
- MENG Dan, LI Xiaojuan, GONG Huili, et al. Analysis of Spatial-Temporal Change of NDVI and Its Climatic Driving Factors in

- Beijing-Tianjin-Hebei Metropolis Circle from 2001 to 2013[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(8): 1001-1007.
- 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 294-302.
- PIAO Shilong, FANG Jingyun. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 294-302.
- 强建华. 遥感技术在新疆南部地区矿山环境调查及生态修复中的应用[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 253-258.
- QIANG Jianhua. Application of Remote Sensing Techniques in Mine Environment Investigation and Ecological Restoration in Southern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 253-258.
- 王化齐, 尹立河, 李彦娥, 等. 宁夏沿黄生态经济区生态系统服务价值及其提升对策[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 196-203.
- WANG Huaqi, YIN Lihe, LI Yan'e, et al. Ecological System Service Value Assessment and Improving Countermeasures in Ningxia Yellow River Ecological Economic Zone[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 196-203.
- 王鹏, 刘拓, 邱德明. 基于局部惩罚型变权的建设用地生态适宜性空间模糊评价——以陕西延安宝塔区为例[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 232-241.
- WANG Peng, LIU Tuo, QIU Deming. Spatial Fuzzy Assessment of Ecological Suitability for Urban Land Use Based on Local Penalty Variable Weights: A Case Study of Yan'an Baota District[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 232-241.
- 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- WANG Qiang, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- 王炜航, 王咏林, 赵净民. 辽西北地区土地沙漠化现状及防治对策[J]. *地质与资源*, 2010, 19(1): 50-52.
- WANG Weihang, WANG Yonglin, ZHAO Jingmin. Current situation and countermeasures of the land desertification in northwestern Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(1): 50-52.
- 武正丽, 贾文雄, 赵珍, 等. 2000-2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1241-1252.
- WU Zhengli, JIA Wenxiong, ZHAO Zhen, et al. Spatial-temporal variations of vegetation and its correlation with climatic factors in Qilian Mountains from 2000 to 2012[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(6): 1241-1252.
- 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, (1): 237-246.
- XU Jiaxin, FANG Shibo, ZHANG Tingbin, 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 Land & Resources*, 2020, (1): 237-246.
- 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- YANG Yuanhe, PIAO Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8.
- 尤南山, 蒙吉军, 孙慕天. 2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(1): 171-181.
- YOU Nanshan, MENG Jijun, SUN Mutian. Spatio-temporal Change of NDVI and Its Relationship with Climate in the Upper and Middle Reaches of Heihe River Basin from 2000 to 2015[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(1): 171-181.
- 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- 张新悦, 冯禹昊, 曾辉唐, 等. 1982—2014 年华北及周边地区生长季 NDVI 变化及其与气候的关系[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 153-161.
- ZHANG Xinyue, FENG Yuhao, ZENG Huitang, et al. Change of NDVI during Growing Season and Its Relationship with Climate in North China and the Adjacent Areas from 1982 to 2014[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(1): 153-161.
- Wardlow B D, Egbert S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: An assessment for the U. S. Central Great Plains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1096-1116.