

中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动

徐光来^{1,2} 李爱娟^{1,2} 徐晓华^{1*} 杨先成^{1,2} 杨强强^{1,2}

¹安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002; ²安徽省江淮流域地表过程与区域响应重点实验室, 安徽芜湖 241002

摘要 为揭示生态功能保护区归一化植被指数(*NDVI*)与气候因子相关性, 为今后该区域植被动态监测提供有用的信息, 该研究基于2000–2015年MODIS *NDVI*数据和逐月格点降水与气温数据, 采用生态功能保护区和像元两种空间尺度, 应用线性倾向分析、偏相关分析、复相关分析等方法研究了46个生态功能保护区*NDVI*变化及其与气候因子的关系, 在此基础上基于相关性显著性水平对生态功能保护区*NDVI*动态进行了气候因子驱动分区。主要结果: (1)生态功能保护区*NDVI*总体呈增加趋势, 其增率加权平均值为 $0.045 \cdot a^{-1}$ 。像元分析表明, *NDVI*显著增加的区域主要分布在中部和东北部。(2)生态功能保护区*NDVI*与降水的偏相关系数在 -0.30 – 0.72 之间, 在32个分区呈正相关关系。*NDVI*与气温的偏相关性在 -0.36 – 0.92 之间, 在39个分区呈正相关关系。像元分析表明, 50.6%的像元*NDVI*与降水呈显著正偏相关关系, 主要分布在东北及西北地区。64.6%的像元*NDVI*与气温呈显著正偏相关关系, 主要分布在东北及青藏高原北缘地区。(3)气温-降水强驱动型是主要驱动类型, 占总面积的38.7%; 气温驱动型为次要驱动类型, 占27.3%; 非气候因子驱动型占17.6%。以上结果表明, 生态功能保护区*NDVI*与气温、降水气候因子改变具有显著相关性, 气候因子驱动的地区共占82.4%。研究气候变暖背景下生态功能保护区*NDVI*变化及其对气候因子的响应, 对于认识该区植被动态变化规律具有重要作用。

关键词 生态功能保护区; 归一化植被指数; 气候因子; 偏相关分析; 气候驱动分区

徐光来, 李爱娟, 徐晓华, 杨先成, 杨强强 (2021). 中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动. 植物生态学报, 45, 00–00. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0096

NDVI dynamics and driving climatic factors in the Protected Zones for Ecological Functions in China

XU Guang-Lai^{1,2}, LI Ai-Juan^{1,2}, XU Xiao-Hua^{1*}, YANG Xian-Cheng^{1,2}, and YANG Qiang-Qiang^{1,2}

¹School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China; and ²Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241002, China

Abstract

Aims This study demonstrates the consistencies and discrepancies of correlations between climate factors and normalized difference vegetation index (*NDVI*) in the Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs) in China, which provide useful information for monitoring in subsequent studies of vegetation dynamics.

Methods Based on the MODIS *NDVI* data and the grid data for monthly precipitation and temperatures from 2000 to 2015, the dynamics of *NDVI* and correlations with climatic factors were examined across 46 EFPZs at two spatial scales, by individual EFPZs and the pixels, using linear tendency and partial correlation methods. In accordance to the analyses, the EFPZs were categorized into different types of climatic influences.

Important findings The overall *NDVI* across the EFPZs showed an increasing trend, with the average linear slope of $0.045 \cdot a^{-1}$. Pixel scale analysis showed that *NDVI* increased significantly in the central regions and the northeast of China. Partial correlation coefficients between *NDVI* and precipitation in the EFPZs varied between -0.30 to 0.72 , and were positive for 32 of the EFPZs. Partial correlation between *NDVI* and air temperature ranged from -0.36 to 0.92 , with positive correlations in 39 of the EFPZs. In 50.6% of the pixels, *NDVI* was positively correlated with precipitation, mainly in northeast and northwest China. In 64.6% of the pixels, *NDVI* was positively correlated with temperatures, mainly in the northeastern and the northern edge of the Qingzang Plateau. Strong temperature-precipitation driving is the main type of climatic influences on *NDVI* changes across the

收稿日期Received: 2020-04-07 接受日期Accepted: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(41301029). Supported by the National Natural Science Foundation of China (41301029).

* 通信作者Corresponding author (xuxh1113@126.com)

EFPZs, accounting for 38.7% of the total, with temperature driving type being secondary, accounting for 27.3%; non-climatic driving type accounts for 17.6%. Our results show the *NDVI* in EFPZs are significantly correlated with climatic factors concerning precipitation and temperatures, and that *NDVI* dynamics in 82.4% of the areas are driven by climate factors. Studying the changes in *NDVI* and the responses of *NDVI* to climate factors is very important for understanding the dynamics of vegetation in EFPZs under climate warming.

Key words ecological function protected zone (EFPZ); normalized difference vegetation index (*NDVI*); climatic factors; partial correlation analysis; climate driving type zone

Xu GL, Li AJ, Xu XH, Yang XC, Yang QQ (2021). *NDVI* dynamics and driving climatic factors in the Protected Zones for Ecological Functions in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 00–00. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0096

生态功能保护区是根据不同区域和类型划定的,旨在保持区域生态系统结构完整性,保证生态系统服务功能稳定性,从而保障区域生态安全的重要区域。其在区域生态保护与建设、生态保护红线划定、国土空间开发优化等方面发挥着重要作用(环境保护部和中国科学院, 2015)。生态功能保护区也是生态环境脆弱区和气候变化敏感区。近十几年来,森林、草原等陆地生态系统及动物物候、分布区、物种数量受到气候变化和人类活动的双重影响(第三次气候变化国家评估报告编写委员会, 2015)。其中,植被作为陆地生态系统的重要组成部分,关系着区域生态系统格局、结构与功能,在水源涵养、水土保持和径流调节等方面起着非常重要的作用。已有观测表明,1951–2018年,亚洲陆地表面平均气温呈显著上升趋势,升温速率为每10年0.23 °C(中国气象局气候变化中心, 2019)。地表温度和降水是影响植被分布、生长和演替的重要气候因素,而植被变化也是全球及区域气候变化的重要影响因子(王计平等, 2017)。因此,利用卫星遥感数据对生态功能区植被覆盖进行大空间尺度、长时间序列连续监测,对其动态变化进行气候因子驱动分析,其结果对于保障区域生态安全和应对气候变化具有重要的实践意义。

归一化植被指数(*NDVI*)作为指示性参数,被广泛地应用到地表植被覆盖遥感监测等研究中(Verbyla, 2015; Mbatha & Xulu, 2018)。侯鹏等(2013)基于年累积 *NDVI* 监测评估了1998–2007年间国家生态保护重要区域的植被长势特征,结果表明植被变好趋势明显。Zheng等(2018)基于逐步聚类预测模型对长江、黄河和澜沧江的三江源区*NDVI*变化行了预测。Guo等(2017)研究表明东北地区植物生长季80%面积的*NDVI*呈增加趋势,温度是影响植被覆盖的首要因子。李丽丽等(2018)在中国西北石羊河流域生态功能区的研究表明,地面温度是植被覆盖度

空间格局变化的主要气候制约因素。

本研究以我国生态功能保护区为研究区,采用多种相关性分析方法和不同时空尺度研究气候变化下*NDVI*时空变化、*NDVI*与气候因子相关性以及*NDVI*气候因子驱动类型分区。研究旨在辨识变化环境条件下生态功能保护区植被覆盖动态变化规律,以期为区域生态保护和修复提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

中国生态功能保护区根据各分区对保障国家生态安全的重要性,以水源涵养、土壤保持、防风固沙、生物多样性保护、洪水调蓄和海洋生态功能保护等6类主导生态调节功能为基础,初步确定了50个重要生态服务功能分区(环境保护部和中国科学院, 2008)。本文选择了除海洋生态功能保护区以外的5类生态功能区的46个分区进行研究(图1),总面积为 $213.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占我国陆地面积的22.3%。

1.2 数据及处理

月*NDVI*数据来自中国500 M *NDVI*月合成产品(<http://www.gscloud.cn>),该产品由MODND1D通过取月内每天最大值计算得到,时间分辨率为月,空间分辨率为500 m,序列长度为2000年1月–2015年5月。考虑到北方地区冬季冰雪覆盖因素,本文选择4–10月*NDVI*累积值的平均值作为年*NDVI*值(罗敏等, 2017),采用同期内降水、气温的月平均值进行气候背景分析及*NDVI*与气候因子相关性分析。为排除水体、城市用地和冰雪覆盖层等非植被因素的干扰,采用大于0.1的值作为植被*NDVI*的阈值(郑海亮等, 2019)。

中国生态功能保护区数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)。气象数据来源于中国地面降水和气温日值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集

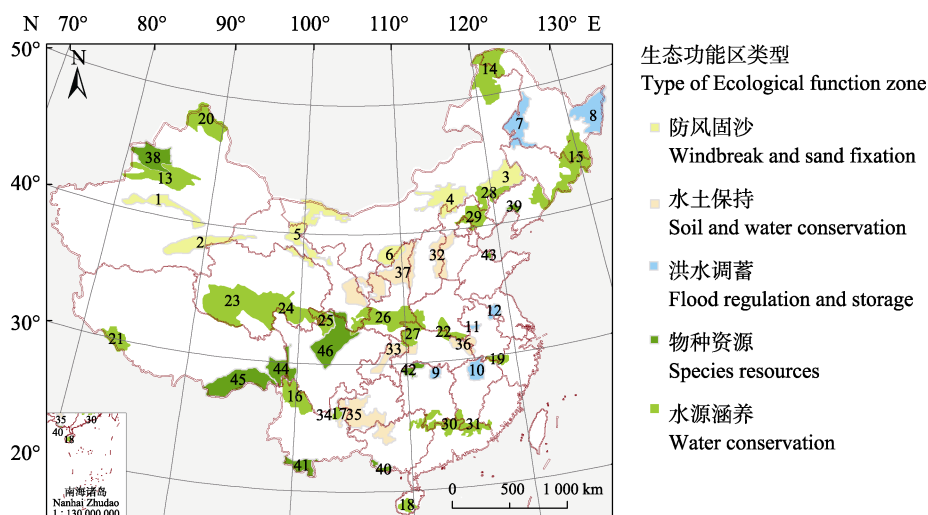


图1 中国生态功能保护区分布图。防风固沙生态功能区: 1, 塔里木河流域; 2, 阿尔金荒漠草原; 3, 科尔沁沙地; 4, 阴山北麓-浑善达克沙地; 5, 黑河流域生态功能区; 6, 毛乌素沙地。洪水调蓄生态功能区: 7, 松嫩平原湿地; 8, 三江平原湿地; 9, 洞庭湖区; 10, 鄱阳湖区; 11, 沿淮河蓄洪区; 12, 南水北调东段工程水源区。水源涵养生态功能区: 13, 天山山地; 14, 大兴安岭; 15, 长白山山地; 16, 滇西北; 17, 珠江源(云南部分); 18, 海南岛中部山区; 19, 新安江上游水源涵养; 20, 阿尔泰山地; 21, 雅鲁藏布江源头; 22, 淮河源; 23, 长江源; 24, 黄河源; 25, 若尔盖-玛曲; 26, 秦岭山地; 27, 南水北调中线工程水源区; 28, 西辽河源; 29, 京津水源涵养; 30, 南岭山地; 31, 江西东江源。水土保持生态功能区: 32, 太行山地; 33, 三峡库区; 34, 云南东川; 35, 西南喀斯特; 36, 大别山山地; 37, 黄土高原。物种资源生态功能区: 38, 伊犁-天山山地西段; 39, 辽河三角洲湿地; 40, 桂西南石灰岩; 41, 西双版纳; 42, 武陵山山地; 43, 黄河三角洲湿地; 44, 横断山南部; 45, 藏东南山地; 46, 岷山-邛崃山。

Fig. 1 Map of the Protected Zones for Ecological Functions in China. Ecological function zones of windbreak and sand fixation type: 1, Tarim River basin; 2, Altun desert grassland; 3, Horqin Sandy Land; 4, Sandy land of the northern foot of Yinshan Mountain and Onqin Daga; 5, Heihe River basin ecological function protection area; 6, Mau Us sandy land. Ecological function zones of flood regulation and storage: 7, Songnen Plain wetland; 8, Sanjiang Plain wetland; 9, Dongting Lake area; 10, Poyang Lake area; 11, Flood storage area along Huaihe River; 12, Water source area of east route of south-north water transfer project. Ecological functional zones of water conservation: 13, Tianshan Mountain; 14, Da Hinggan Mountains; 15, Changbai Mountain; 16, Northwest Yunnan; 17, Source regions of Pearl River (Located in Yunnan); 18, Central mountain area of Hainan Island; 19, Water conservation of the upper reaches of Xin'an River; 20, Altai Mountain; 21, Source of Yarlung Zangbo River; 22, Source regions of Huaihe River; 23, Source regions of Yangtze River; 24, Source regions of Yellow River; 25, Zoigê-Maqu; 26, Qinling Mountain; 27, Water source area of the middle route of south-north water transfer project; 28, Source regions of west Liaohe River; 29, water conservation of Beijing and Tianjin; 30, Nanling Mountain; 31, Source regions of Dongjiang of Jiangxi Province. Ecological function zones of soil and water conservation: 32, Taihang Mountain; 33, Three Gorges Reservoir area; 34, Dongchuan of Yunnan province; 35, Southwest karst; 36, Dabie Mountain; 37, Loess Plateau. Ecological function zones of species resources: 38, West section of Ili and Tianshan Mountain; 39, Liaohe Delta wetland; 40, Limestone in Southwest Guangxi; 41, Xishuangbanna; 42, Wuling Mountain; 43, Yellow River Delta wetland; 44, South of Hengduan Mountain; 45, Southeast Xizang mountain; 46, Minshan and Qionglai Mountain.

(V2.0)(<http://data.cma.cn/>)。该数据集包括由2 474个国家级台站的降水日值资料和由全球数字高程模型(GTOPO30)数据经过重采样生产的中国陆地数字高程模型,采用薄盘样条法进行空间内插得到。本文选择了月降水量和月平均气温等作为气候因子。

将生态功能保护区与 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 格网叠加生成掩膜,分别提取最终得到像元为 25 km^2 格网(边界区等不规则格网小于 25 km^2)空间尺度的NDVI、降水和气温栅格数据,根据NDVI的阈值,删除非植被区的栅格。考虑规律的尺度依赖和减小统计分析的不确定性,本文采用生态功能分区和像元两种空间尺度、年和月两种时间尺度进行分析。通过像元值与像元面积加权平均得到分区值。

1.3 趋势分析和相关性分析

采用4–10月年累积的平均值与年份的线性倾向表征NDVI变化率,采用年累积值与年份的相关系数 t 检验判断NDVI年变化趋势的显著性。降水和气温变化采用同样的方法表征年变化。由于2015年缺失部分月份数据,降水和气温年变化分析中采用2000–2014年4–10月的平均值进行分析。

采用月NDVI与相同月值气候因子的偏相关性判断植被与气候因子作用关系的性质和强度。该月值数据为2000–2015年4–10月数据,其中缺失2010年10月和2011年10月数据,序列长度为105。偏相关分析能排除影响因素之间的相关性的干扰,从而分析NDVI与单一气象要素的关系(田义超和梁铭忠, 2016)。偏相关系数的计算公式为:

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

式中, r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为变量 x 与 y 、变量 x 与 z 、变量 y 与 z 之间的线性相关系数; $r_{xy,z}$ 为将变量 z 固定后 x 与 y 的相关系数。本文中, x 表示NDVI, y 、 z 表示气温和降水。偏相关系数的显著性检验采用 t 检验, 其统计量计算公式为:

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

式中, $r_{xy,z}$ 为因变量 x 与自变量 y 在控制自变量 z 条件下的偏相关系数, n 为样本数, 本文中 n 为105; m 为自变量个数, 本文中 m 为2。

采用月NDVI与相同月值气候因子复相关系数表征降水和气温对NDVI的综合影响, 其计算公式如下:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (3)$$

式中, $r_{x,yz}$ 为因变量 x 与自变量 y 、 z 的复相关系数, r_{xy} 为变量 x 与 y 之间的线性相关系数, $r_{xz,y}$ 为因变量 x 与自变量 z 在控制自变量 y 条件下的偏相关系数。复相关系数的显著性采用 F 检验, 其统计量计算公式为:

$$F = \frac{r_{x,yz}^2}{1 - r_{x,yz}^2} \times \frac{n - m - 1}{m} \quad (4)$$

式中, $r_{x,yz}$ 为复相关系数, n 为样本数, 本文中 n 为105; m 为自变量个数, 本文中 m 为2。

1.4 NDVI变化驱动力分区

气候因子和人类活动是NDVI的主要驱动力。其中, 气候因子尤其是降水和气温对植被覆盖具有重要的作用。对NDVI变化进行气候因子驱动分区, 则可进一步了解NDVI在区域尺度上的变化规律。参考

以往研究(陈云浩等, 2001; 王强等, 2017; 王芳等, 2018), 根据NDVI与降水、气温的偏相关显著性水平、复相关显著性水平制定判断准则进行驱动因子分区。本文中准则依据相关性显著性水平设置为0.01, 以突出降水、气温因子与NDVI变化相关性置信度(表1)。

2 结果和分析

2.1 降水和气温年变化

从分区上看(像元值面积加权平均), 大部分分区月降水量和气温未见显著变化。月降水量方面, 松嫩平原湿地(7)、长江源(23)和黄河源(24)等3个分区呈极显著增加的趋势($p < 0.01$), 6个生态功能分区呈显著增加的趋势($p < 0.05$), 其余37个分区未见显著变化。月平均气温方面, 珠江源云南部分(17)、若尔盖-玛曲(25)、南岭山地(30)、横断山南部(44)和岷山-邛崃山(46)等5个生态功能分区呈极显著增加的趋势($p < 0.01$), 12个生态功能分区呈显著增加的趋势($p < 0.05$), 其余29个分区未见显著变化(图2)。值得注意的是, 观测到气温和降水增加均达到显著水平($p < 0.05$)的区域有黑河流域(5)、长江源(23)、黄河源(24)、若尔盖-玛曲(25)和岷山-邛崃山(46)等5个分区。

像元尺度分析表明, 降水增加达到显著水平的面积占总面积的22.1%, 主要分布在东北和西北(图3A)。其中通过0.01显著性检验的面积约占研究区总面积的6.7%, 主要分布在松嫩平原湿地(7)、长江源(23)、黄河源(24)等分区; 通过0.05显著性检验的面积占15.4%, 主要分布在东北的科尔沁沙地(3)、三江平原湿地(8)、大兴安岭(14), 西北的黑河流域(5)、若尔盖-玛曲(25)、岷山-邛崃山(46)等分区以及黄土

表1 归一化植被指数(NDVI)变化驱动力分区准则

Table 1 Zoning rules for drivers of normalized difference vegetation index (NDVI) changes

NDVI变化驱动因子 NDVI changes driving factor	NDVI变化驱动类型 NDVI change driving type	准则 Rule		
		$r_{NDVI-P,T}$	$r_{NDVI-T,P}$	$r_{NDVI-PT}$
气候因子 Climate factor	气温降水强驱动型[T+P] ⁺ Strong temperature-precipitation driving type	$ t > t_{0.01}$	$ t > t_{0.01}$	$F > F_{0.01}$
	降水驱动型P Precipitation driving type		$ t > t_{0.01}$	$F > F_{0.01}$
	气温驱动型T Temperature driving type	$ t > t_{0.01}$		$F > F_{0.01}$
	气温降水弱驱动型[T+P] ⁻ Weak temperature-precipitation driving type	$ t \leq t_{0.01}$	$ t \leq t_{0.01}$	$F > F_{0.01}$
非气候因子 Non-climate factor	非气候因子驱动型NC Non-climatic driving type			$F \leq F_{0.01}$

T, 气温; P, 降水。 $r_{NDVI-P,T}$, NDVI与降水偏相关的 t 显著性检验; $r_{NDVI-T,P}$, NDVI与气温偏相关的 t 显著性检验; $r_{NDVI-PT}$, NDVI与气温-降水复相关的 F 显著性检验。

T, temperature; P, precipitation. $r_{NDVI-P,T}$, t -test significance of the partial correlations between NDVI and precipitation; $r_{NDVI-T,P}$, t -test significance of the partial correlations between NDVI and temperature; $r_{NDVI-PT}$, F -test significance of the multiple correlations between NDVI and temperature-precipitation.

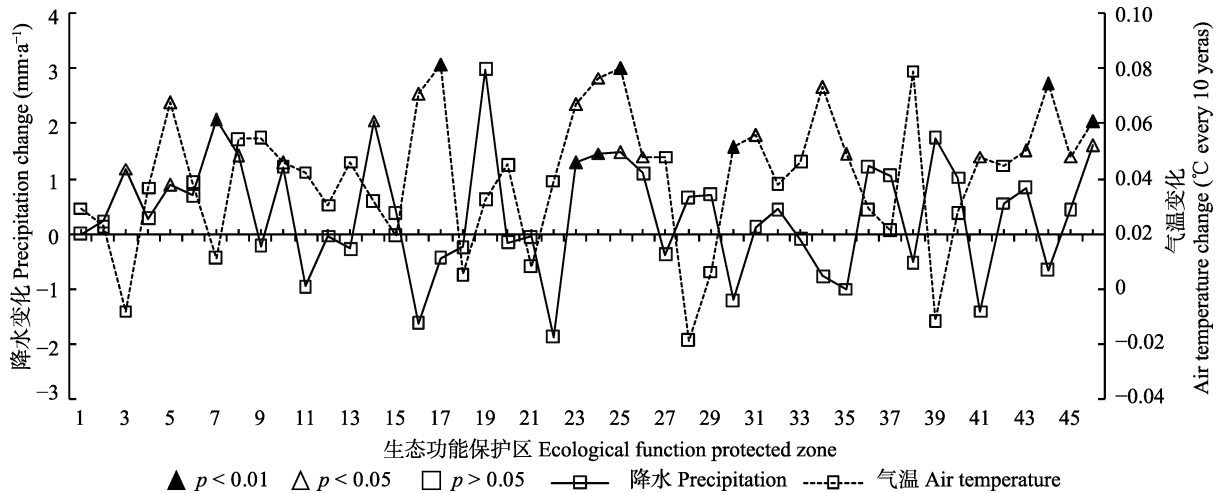


图2 中国生态功能保护区降水和气温变化率。生态功能保护区编号见图1。

Fig. 2 Rates of changes in precipitation and temperatures in Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs) in China. See Fig. 1 for the numbering of EFPZs.

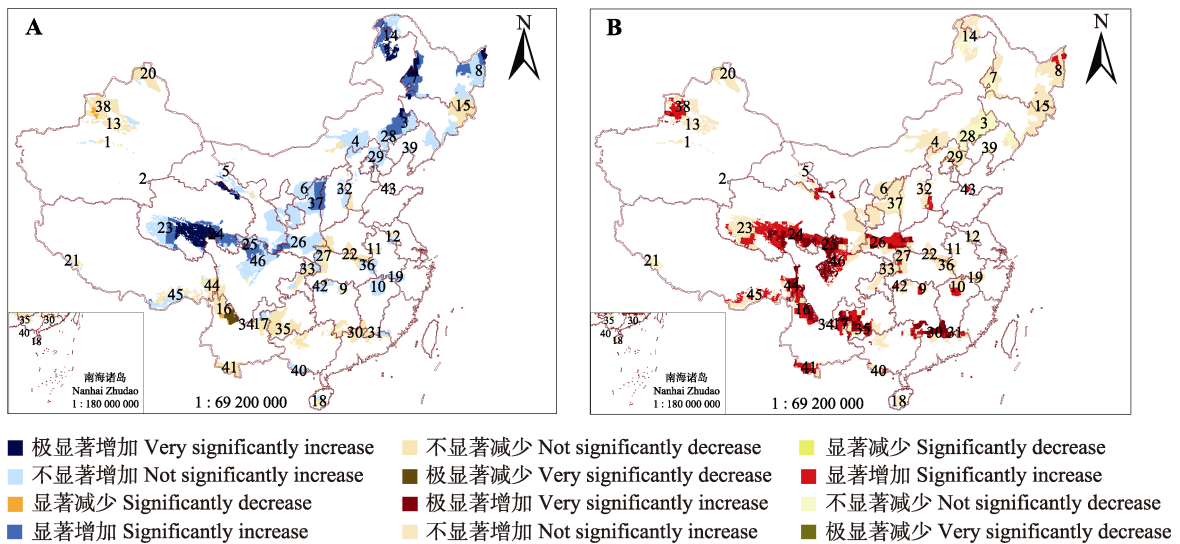


图3 中国生态功能保护区气候因子变化。A, 降水。B, 气温。生态功能保护区编号见图1。

Fig. 3 Changes of climatic factors in Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs) in China. A, Precipitation. B, Air temperature. See Fig. 1 for the numbering of EFPZs.

高原(37)东部地区。未见显著趋势变化的面积占比最多(76.6%), 显著减少的区域占比最少(1.3%)。

像元尺度上, 气温增加达到显著水平的面积占总面积的30.8%, 主要分布在西北和西南地区(图3B)。其中通过0.01显著性检验的面积约占总面积的10.7%, 主要分布在珠江源云南部分(17)、若尔盖-玛曲(25)、南岭山地(30)、横断山南部(44)和岷山-邛崃山(46)等区; 通过0.05显著性检验的面积约占总面积的20.1%, 主要分布在黑河流域(5)、鄱阳湖(10)、滇西北(16)、长江源(23)、黄河源(24)、秦岭山地(26)、江西东江源(31)、云南东川(34)、西南喀斯特(35)、西双版纳(41)、黄河三角洲湿地(43)和藏东南山地(45)等区。未见显著趋势变化的面积

占比最多69.1%, 显著减少的区域占比最少(<0.1%)。

2.2 年累积NDVI动态变化

分区NDVI总体呈上升的趋势, 大部分分区NDVI增加达到显著水平(图4)。46个生态功能保护区分区的增率平均值(面积加权)为 $0.045 \cdot a^{-1}$ 。NDVI增加速度最快的两个区为黄土高原($0.134 \cdot a^{-1}$)和沿淮河蓄洪区($0.120 \cdot a^{-1}$), 其他增加达到显著水平的区域NDVI增率为 $(0.019-0.087) \cdot a^{-1}$ 。27个分区NDVI增加达到极显著水平($p < 0.01$), 占总面积的67.2%; 6个分区NDVI增加达到显著水平($p < 0.05$), 占总面积的9.1%; 11个分区的NDVI未见显著变化, 占总面积的23.7%。

像元NDVI增加幅度上, 绝大部分像元增率为 $<0.1 \cdot a^{-1}$, 占总面积的79.5%。其次是 $(0.1-0.2) \cdot a^{-1}$ 的区域, 约占10.2%。中部地区、东北地区增率较大, 黄土高原(37)、秦岭山地(26)、南水北调中线工程区(27)、松嫩平原湿地(7)、科尔沁沙地(3)、西辽河源(28)和京津水源涵养(29)等生态保护区植被生态恢复明显。西部和南部增率较小, 局部地区植被有退化现象(图5A)。

像元NDVI增加趋势方面, 达到显著水平的面积占总面积的64.7%, 主要分布在中部地区和东北地区。其中通过0.01显著性检验的面积为 $87.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占总面积的54.1%。通过0.05显著性检验的面积为 $17.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占总面积的10.6%。NDVI

减小趋势达到显著水平的面积仅占总面积的0.6%, 其中通过0.01和0.05显著性检验的面积分别占0.2%和0.4%。NDVI未见显著变化的面积占总面积的34.5%, 主要分布在西部和西南部(图5B)。

2.3 NDVI与气候因子的偏相关性

2.3.1 偏相关性

分区NDVI与降水的偏相关系数为 $-0.40-0.45$ (图6)。其中, 大多数分区(29个)不显著偏相关。9个分区正偏相关达到显著水平, 按偏相关性由高到低分别为毛乌素沙地(6)、黄土高原(37)、太行山地(32)、阴山北麓-浑善达克沙地(4)、黑河流域(5)、辽河三角洲湿地(39)、雅鲁藏布江源头(21)、松嫩平原湿地(7)和天山山地(13)。8个分区负偏相关达到显

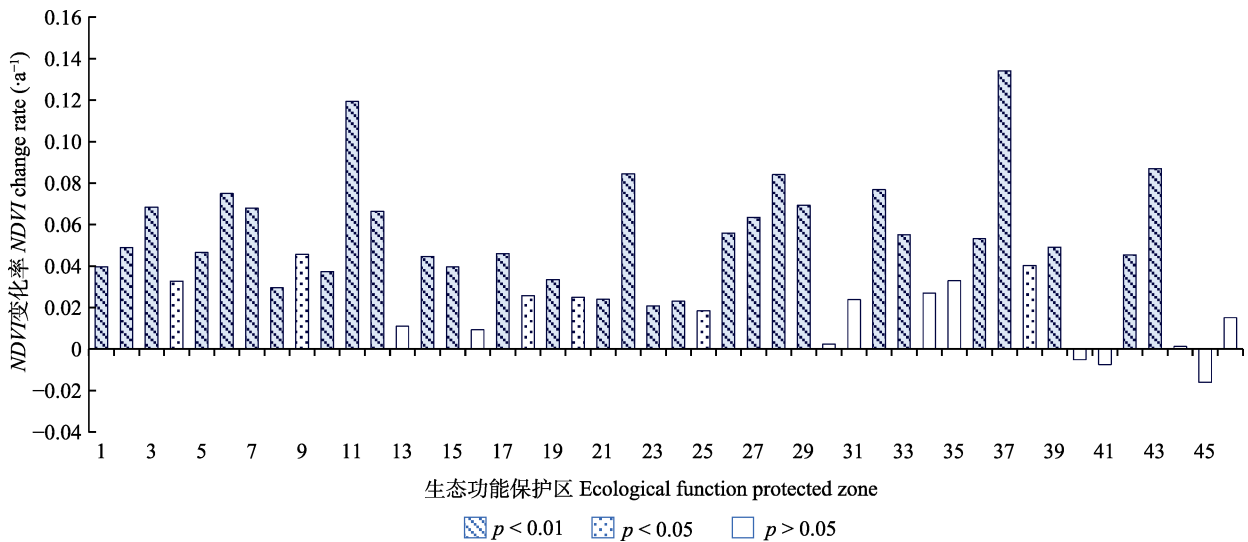


图4 中国生态功能保护区NDVI年变化。生态功能保护区编号见图1。

Fig. 4 Rate of changes in annual cumulative NDVI in Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs) in China. See Fig. 1 for the numbering of EFPZs.

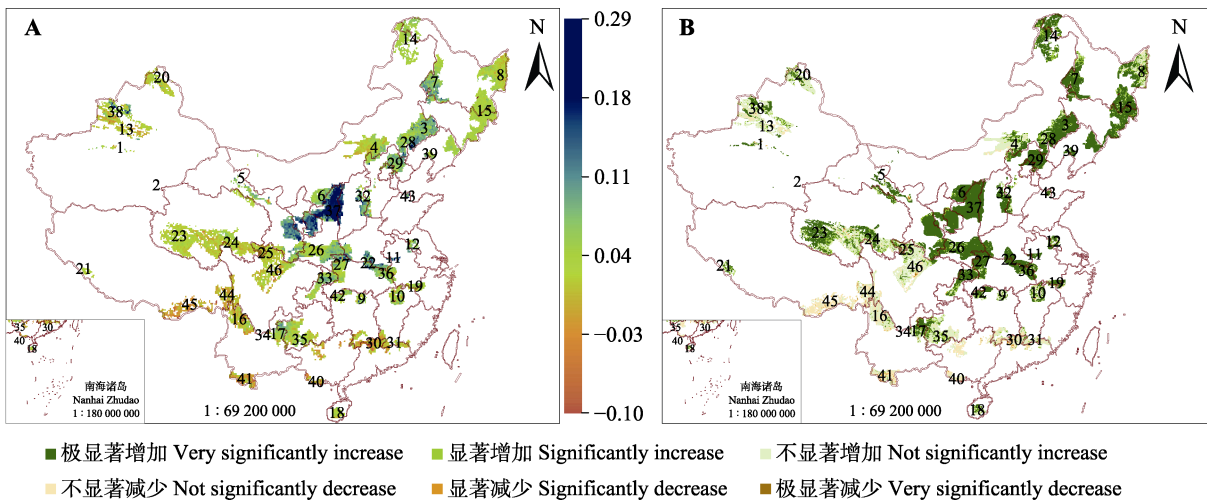


图5 像元尺度归一化植被指数(NDVI)年变化。A, 变化率。B, 显著水平。生态功能保护区编号见图1。

Fig. 5 Annual change in normalized difference vegetation index (NDVI) at pixel scale. A, Change rate. B, Significance level. See Fig. 1 for the numbering of EFPZs.

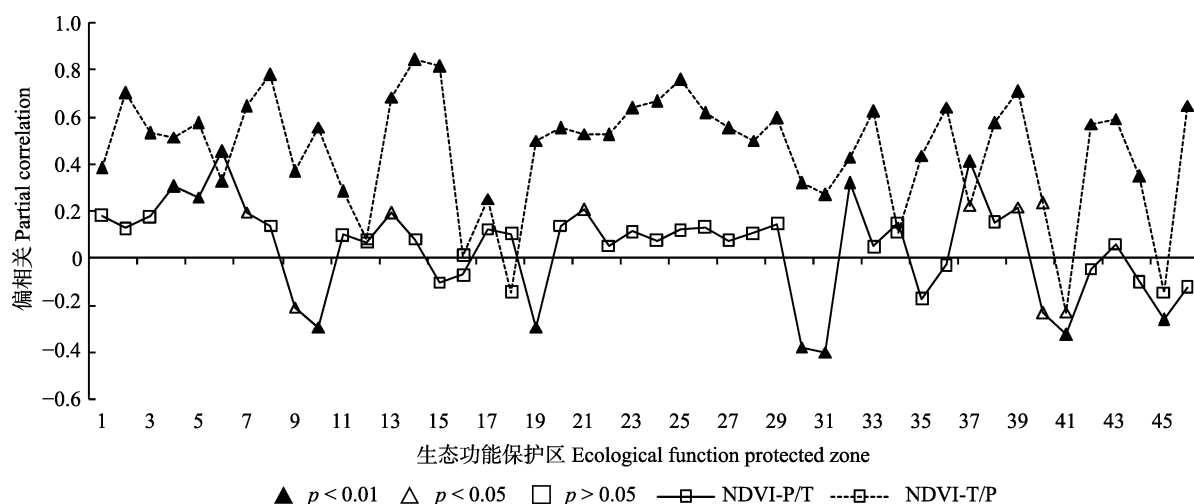


图6 归一化植被指数(NDVI)与降水(NDVI-P/T)、气温(NDVI-T/P)偏相关系数。生态功能保护区编号见图1。

Fig. 6 Partial correlation coefficients of normalized difference vegetation index (NDVI) with precipitation (NDVI-P/T) and air temperature (NDVI-T/P). See Fig. 1 for numbering of Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs).

著水平, 由高到低分别为江西东江源(31)、南岭山地(30)、西双版纳(41)、新安江上游水源涵养(19)、鄱阳湖(10)、藏东南山地(45)、桂西南石灰岩(40)和洞庭湖区(9)。

分区NDVI与气温的偏相关系数为 $-0.23-0.85$ (图6)。其中, 大多数分区(40个)呈显著正偏相关关系。云南东川(34)、南水北调东段工程水源区(12)、滇西北(16)、海南岛中部山区(18)和藏东南山地(45)等5个分区无显著偏相关关系。仅西双版纳区(41) 1个分区呈显著负偏相关关系。

NDVI与降水的偏相关性小于与气温的偏相关性(偏相关系数面积加权均值分别为 $R_{NDVI-P/T} = 0.07$ 和 $R_{NDVI-T/P} = 0.51$), 42个分区的 $R_{NDVI-P/T}$ 小于 $R_{NDVI-T/P}$ (图6)。

像元NDVI与降水的偏相关系数平均值为0.20(介于 $-0.82-0.91$), 东北及西北地区偏相关性较高, 南方及西南地区偏相关性较低(图7A)。NDVI与降水呈极显著($p < 0.01$)正相关关系的区域面积约占总面积的44.3%, 显著相关($p < 0.05$)的面积占6.3%。NDVI与降水呈极显著($p < 0.01$)负相关关系的区域面积约占总面积的11.2%, 显著负相关($p < 0.05$)的面积占4.3%, 主要分布在西南部和南部地区。研究区中33.9%的区域NDVI与降水无显著偏相关关系。

像元NDVI与气温的偏相关系数均值为0.40(介于 $-0.75-0.98$ 之间), 东北地区及青藏高原北缘偏相关性较高, 中部地区及南部地区偏相关性较低(图7B)。NDVI与气温呈极显著正偏相关关系($p < 0.01$)的区域面积约占总面积的59.2%, 显著相关($p < 0.05$)

的面积占5.4%。NDVI与气温呈极显著负相关关系($p < 0.01$)的区域面积约占总面积的5.7%, 显著负相关($p < 0.05$)的面积占3.1%, 主要分布在中部地区的黄土高原和南部地区。研究区中26.7%的区域NDVI与气温无显著偏相关关系。

2.3.2 NDVI变化的降水和气温驱动分区

像元NDVI与降水和气温的复相关系数介于0.01–0.99之间。高值区位于三江平原湿地(8)、长江源(23)、黄河源(24)、若尔盖-玛曲(25)等分区, 低值区位于淮河源(22)、沿淮河蓄洪区(11)、南水北调中线工程水源区(12)等分区(图8A)。复相关显著性水平达到0.01水平的面积占统计总面积的82.4%。复相关显著性水平达到0.05水平的面积占统计总面积的6.4%。

NDVI气候因子驱动类型分布如图8B所示, 驱动类型像元占分区比例如图9所示。气温-降水强驱动型($[T+P]^+$ 型)为主要驱动类型, 占总面积的38.7%。松嫩平原湿地(7)、科尔沁沙地(3)、大兴安岭(14)、黄河三角洲湿地(43)、辽河三角洲湿地(39)、阴山北麓-浑善达克沙地(4)、黑河流域(5)、塔里木河流域(1)、毛乌素沙地(6)、西辽河源(28)、长江源(23)、天山山地(13)、大别山山地(36)、横断山南部(44)、岷山-邛崃山(46)、京津水源涵养(29)、阿尔泰山地(20)、南岭山地(30)、西双版纳(41)等19个生态功能分区以 $[T+P]^+$ 型为首要驱动类型, $[T+P]^+$ 型像元占分区面积比例均超过29.2%。

气温驱动型(T型)为次要驱动类型, 占总面积的27.3%。雅鲁藏布江源头(21)、长白山山地(15)、若

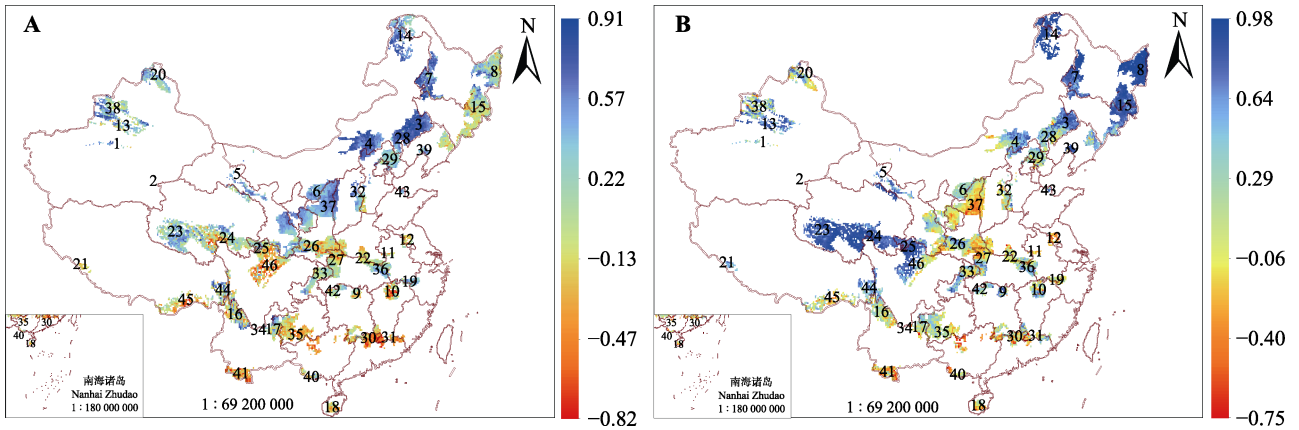


图7 像元尺度归一化植被指数(*NDVI*)与气候因子偏相关性空间分布。A, 降水。B, 气温。生态功能保护区编号见图1。
Fig. 7 Spatial pattern of partial correlations between normalized difference vegetation index (*NDVI*) and climate factors at pixel scale. A, Precipitation. B, Air temperature. See Fig. 1 for numbering of Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs).

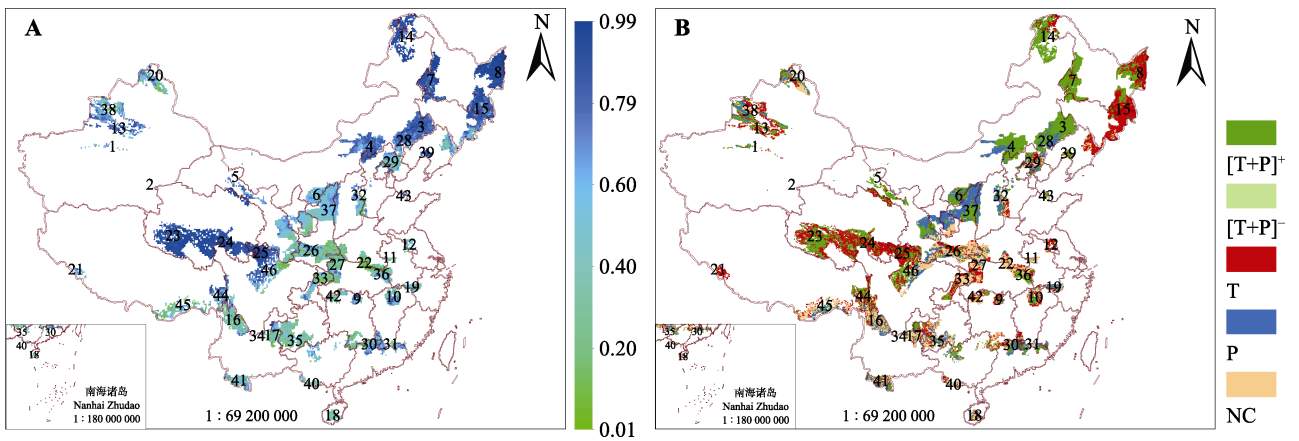


图8 像元尺度归一化植被指数(*NDVI*)的气候因子驱动分区。A, 复相关性。B, 驱动类型区。生态功能保护区编号见图1。*NDVI*的气候因子驱动类型见表1。
Fig. 8 Zoning of driving types in normalized difference vegetation index (*NDVI*) changes at pixel scale. A, Multiple correlations between *NDVI* and climatic factors. B, Driving type zone. See Fig. 1 for numbering of Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs). See Table 1 for driving type of climatic influences on *NDVI* changes.

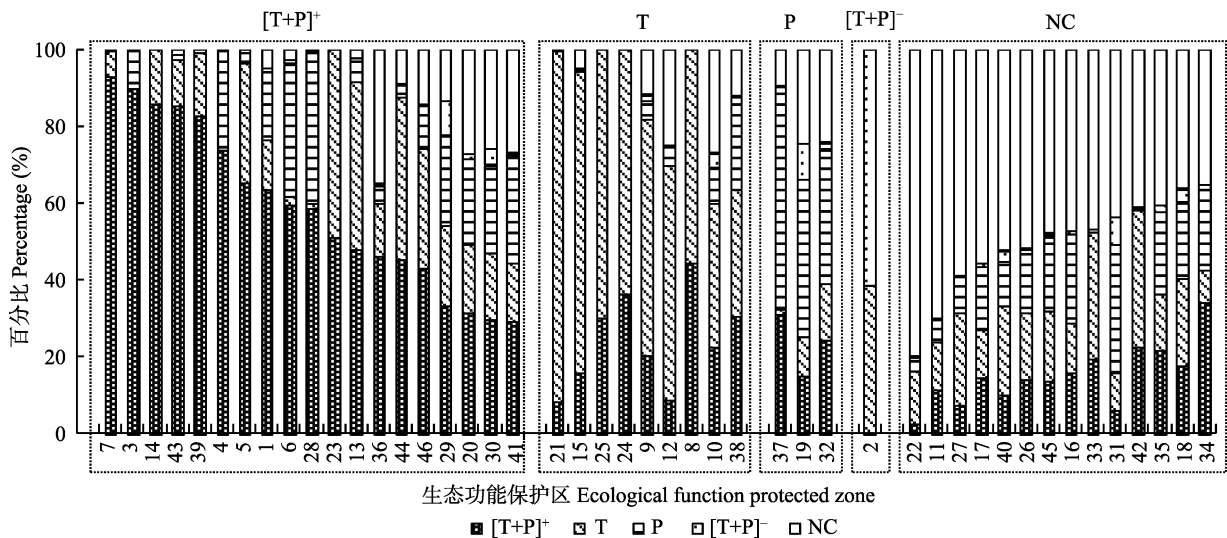


图9 中国生态功能保护区归一化植被指数(*NDVI*)气候驱动分区。生态功能保护区编号见图1。*NDVI*的气候因子驱动类型见表1。
Fig. 9 Zoning of climatic driving types in normalized difference vegetation index (*NDVI*) in Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs) in China. See Fig. 1 for numbering of Protected Zones for Ecological Functions (EFPZs). See Table 1 for driving type of climatic influences on *NDVI* changes.

尔盖-玛曲(25)、黄河源(24)、洞庭湖区(9)、南水北调东段工程水源区(12)、三江平原湿地(8)、鄱阳湖(10)、伊犁-天山山地西段(38)等9个生态功能分区以T型为首要驱动类型, T型像元占分区面积比例均超过33.0%。

降水驱动型(P型)占15.4%。黄土高原(37)、新安江上游水源涵养(19)、太行山地(32)等3个生态功能分区以P型为首要驱动类型, P型像元占分区面积比例均超过34.6%。

气温-降水弱驱动型([T+P]⁻型)的地区是占比最少的驱动类型, 占总面积的0.8%。仅阿尔金荒漠草原(2) 1个生态功能分区以[T+P]⁻型为首要驱动类型, 该驱动型像元面积占分区面积的61.6%。

非气候因子驱动型(NC型)也有较高的比重, 占总面积的17.6%。有14个生态功能分区以NC型为首要驱动类型, 分别为淮河源(22)、沿淮河蓄洪区(11)、南水北调中线工程水源区(27)、珠江源云南部分(17)、桂西南石灰岩(40)、秦岭山地(26)、藏东南山地(45)、滇西北(16)、三峡库区(33)、江西东江源(31)、武陵山山地(42)、西南喀斯特(35)、海南岛中部山区(18)、云南东川(34)等生态功能分区, 其NC像元占分区面积比例均超过35.4%。

3 讨论和结论

3.1 讨论

生态功能保护区是国家根据区域生态系统格局、生态环境敏感性与生态系统服务功能空间分异规律, 将区域划分成不同生态功能的地区。本文研究表明, 我国生态功能区NDVI总体呈增加的趋势, 尤其是北方地区。这与全球及全国其他地区的研究具有较好的一致性(Lu *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2019), 可能与气候变暖的背景下气温升高的积温效应有助于植物生长有关。

已有研究表明NDVI变化与气候因子具有较好的相关性。Jin等(2016)分析认为北半球原始森林植被约60.9%的NDVI的增加与气候变量, 尤其是生长季节温度的增加显著相关。本研究中大部分生态功能保护区NDVI与气温的偏相关性都高于与降水的偏相关性, 表明大部分生态功能保护区气温是影响植被覆盖的首要气候因子。内蒙古(Gong *et al.*, 2015)、西南喀斯特地区(Hou *et al.*, 2015)、黑龙江流域(Chu *et al.*, 2019)等区域研究表明气温是影响植

被生长的主要气候因子, 气候变暖变干, 温度和日照时间的增加促进植被净初级生产力(NPP)的增加。降水变化不明显, 或者一些地区土壤含水量较高导致大气的降水变化并不一定能促进植被的增长, 可能是影响植被覆盖与降水偏相关性差异的主要因素(王琳等, 2010)。

但是, 影响NDVI的主要气候因子在不同地区有差异, 在同一地区也因植物类型不同而有所差异。青藏高原三江源区研究表明, 降水, 尤其是连续2月平均降水量是影响NDVI变化的关键因子(Zheng *et al.*, 2018)。黄土高原地区的研究表明, 该区平均气温下降, 春季和夏季降水略有增加趋势, 降水是NDVI增加的主要驱动因子(Ning *et al.*, 2015)。河西走廊地区NDVI对海拔的依赖性受到气温升高的影响, 尤其是草地和森林, 但是作物和灌木对NDVI变化的贡献对降水趋势变化较为敏感, 其主要受人类活动的影响(Han *et al.*, 2019)。此外, Piedallu等(2019)的研究表明NDVI不仅受气候因子制约, 还受到土壤环境等因素影响。Wang等(2015)研究发现青藏高原较短日照时间地区NDVI变化较大。Li等(2015)、赵东升等(2019)的研究表明, 近年来“退耕还林”等生态修复项目也促进了植被条件的改善。本研究中, 科尔沁沙地、阴山北麓-浑善达克沙地、毛乌素沙地和黄土高原等干旱区NDVI与降水的偏相关性较高($R > 0.49$)。三江平原湿地、大兴安岭、长江源、辽河三角洲湿地、黄河源、松嫩平原湿地、若尔盖-玛曲等寒冷地区NDVI与气温的偏相关性较高($R > 0.79$)。上述结果表明在高寒和干旱地区, 气温和降水条件是植被变化的限制因子。在驱动类型分区方面, 气候因子驱动的地区共占82.4%, 大部分地区NDVI变化与降水、气温条件的改变具有显著相关性。

3.2 结论

(1) 气候变暖背景下生态功能保护区植被有绿化的趋势, 中部地区、东北地区增加率较大, 黄土高原、秦岭山地、南水北调中线工程区、松嫩平原湿地、科尔沁沙地、西辽河源和京津水源涵养等生态保护区植被绿化明显。2000–2015年期间, 46个生态功能区增率的面积加权均值为 $0.045 \cdot a^{-1}$ 。NDVI具有显著增加趋势的面积占研究区总面积的64.7%。

(2) NDVI的增加与降水、气温的正偏相关性达到显著水平的区域均超过总面积的一半。NDVI与气温的偏相关性高于与降水的偏相关性, 区域差异明

显。50.6%的像元NDVI与降水呈显著正偏相关关系, 主要分布在东北及西北地区。64.6%的像元NDVI与气温呈显著正偏相关关系, 主要分布在东北及青藏高原北缘地区。

(3) 降水和气温是驱动NDVI增加的重要因子, 气温驱动强于降水。[T+P]⁺型占研究区总面积的38.7%, 在松嫩平原湿地、科尔沁沙地、大兴安岭等19个分区为首要驱动类型; T型占27.3%, 在雅鲁藏布江源头、长白山山地、若尔盖-玛曲等9个分区为首要驱动类型; P型占15.4%, 黄土高原、新安江上游水源涵养、太行山地等3个分区为首要驱动类型; [T+P]⁻型占0.8%, 在阿尔金荒漠草原1个分区为首要驱动类型; NC型占17.6%, 在淮河源、沿淮河蓄洪区、南水北调中线工程水源区等14个分区为首要驱动类型。

除降水和气温两个重要气候因素以外, NDVI还受到土壤含水量、地形坡度、日照时间、人类生态修复活动等多种因素的影响。本研究结论仅限于本文数据。对于植被覆盖动态变化的驱动因子还需要结合实地考察、多源数据等多种方法进行更深入的机理研究。

参考文献

- Chen YH, Li XB, Shi PJ (2001). Variation in NDVI driven by climate factors across china, 1983–1992. *Acta Phytocologica Sinica*, 25, 716–720. [陈云浩, 李晓兵, 史培军 (2001). 1983–1992年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 25, 716–720.]
- China's Third National Assessment Report on Climate Change Editing Committee (2015). *The Third National Assessment Report on Climate Change*. Science Press, Beijing. 192–193. [第三次气候变化国家评估报告编写委员会 (2015). 第三次气候变化国家评估报告. 科学出版社, 北京. 192–193.]
- Chu H, Venevsky S, Wu C, Wang M (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650, 2051–2062.
- Climate Change Center of China Meteorological Administration (2019). *Blue Paper on Climate Change in China*. Climate Change Center of China Meteorological Administration, Beijing. 5. [中国气象局气候变化中心 (2019). 中国气候变化蓝皮书. 中国气象局气候变化中心, 北京. 5.]
- Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, Goto M, Wulan T, Alateng D, Yin T, Ito Y (2015). MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia grassland. *Solid Earth*, 6, 1185–1194.
- Guo J, Hu Y, Xiong Z, Yan X, Ren B, Bu R (2017). Spatiotemporal variations of growing-season NDVI associated with climate change in northeastern China's permafrost zone. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26, 1521–1530.
- Han JC, Huang Y, Zhang H, Wu X (2019). Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China. *Journal of Environmental Management*, 232, 1037–1048.
- Hou P, Wang Q, Fang Z, Wang CZ, Wei YC (2013). Satellite-based monitoring and appraising vegetation growth in national key regions of ecological protection. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 780–788. [侯鹏, 王桥, 房志, 王昌佐, 魏彦昌 (2013). 国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估. 生态学报, 33, 780–788.]
- Hou W, Gao J, Wu S, Dai E (2015). Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China. *Remote Sensing*, 7, 11105–11124.
- Jin J, Wang Y, Jiang H, Cheng M (2016). Recent NDVI-based variation in growth of boreal intact forest landscapes and its correlation with climatic variables. *Sustainability*, 8(326), 1–10.
- Li LL, Wang DW, Han T (2018). Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River basin during 2000–2015. *Journal of Desert Research*, 38, 1108–1118. [李丽丽, 王大为, 韩涛 (2018). 2000–2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应. 中国沙漠, 38, 1108–1118.]
- Li S, Yang S, Liu X, Liu Y, Shi M (2015). NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia region, central China. *Remote Sensing*, 7, 11163–11182.
- Liu X, Tian Z, Zhang A, Zhao A, Liu H (2019). Impacts of climate on spatiotemporal variations in vegetation NDVI from 1982–2015 in Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 11(768), 1–22.
- Lu YH, Zhang LW, Feng XM, Zeng Y, Fu BJ, Yao XL, Li JR, Wu BF (2015). Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors. *Scientific Reports*, 5, 8732. DOI: 10.1038/srep08732.
- Luo M, Guli J, Guo H, Guo H, Guo H, Zhang PF, Meng FH, Liu T (2017). Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim river basin from 2000 to 2013. *Journal of Natural Resources*, 32, 50–63. [罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 郭辉, 张鹏飞, 孟凡浩, 刘铁 (2017). 2000–2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析. 自然资源学报, 32, 50–63.]
- Mbatha N, Xulu S (2018). Time series analysis of MODIS-der-

- ived NDVI for the Hluhluwe-Imfolozi park, south Africa: impact of recent intense drought. *Climate*, 6(95), 1–24.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences (2008). *National Ecological Function Zoning*. 17. [环境保护部和中国科学院 (2008). 全国生态功能区划. 17.]
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences (2015). *National Ecological Function Zoning, revised edition*. 8–9. [环境保护部和中国科学院 (2015). 全国生态功能区划(修编版). 8–9.]
- Ning T, Liu W, Lin W, Song X (2015). NDVI variation and its responses to climate change on the northern Loess Plateau of China from 1998 to 2012. *Advances in Meteorology*, 1–10.
- Piedallu C, Cheret V, Denux JP, Perez V, Azcona JS, Seynave I, Gegout JC (2019). Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment*, 651, 2874–2885.
- Tian YC, Liang MZ (2016). The NDVI Characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu gulf coastal region. *Journal of Natural Resources*, 31, 488–502. [田义超, 梁铭忠 (2016). 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征. 自然资源学报, 31, 488–502.]
- Verbyla D (2015). Remote sensing of interannual boreal forest NDVI in relation to climatic conditions in interior Alaska. *Environmental Research Letters*, 10, 125016. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125016.
- Wang F, Wang Z, Zhang Y (2018). Spatio-temporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 2754–2767. [王芳, 汪左, 张运 (2018). 2000–2015年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 38, 2754–2767.]
- Wang H, Liu D, Lin H, Montenegro A, Zhu X (2015). NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 35, 687–698.
- Wang JP, Guo ZJ, Cheng F, Zhang QB, Ma H, Yu YL (2017). Spatio-temporal change in precipitation and surface temperature and their relationships with NDVI of different ecological function zones in north Xinjiang. *Forest Resources Management*, (1), 110–117. [王计平, 郭仲军, 程复, 张启斌, 马欢, 于一雷 (2017). 北疆生态功能区降水气温时空变化及其与NDVI相关性分析. 林业资源管理, (1), 110–117.]
- Wang L, Jing YS, Li K (2010). Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity and climate change effects in Jiangsu province. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 2529–2533. [王琳, 景元书, 李琨 (2010). 江苏省植被NPP时空特征及气候因素的影响. 生态环境学报, 19, 2529–2533.]
- Wang Q, Zhang TB, Yi GH, Chen TT, Bie XJ, He YX (2017). Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan Mountain area from 2004 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 3084–3095. [王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱 (2017). 横断山区2004–2014年植被NPP时空变化及其驱动因子. 生态学报, 37, 3084–3095.]
- Zhao DS, Guo CY, Guo YQ, Liu L, Gao X, Zhang JC, Zhu Y, Zhang XM (2019). Effects of climate change on major ecological projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8780–8788. [赵东升, 郭彩赞, 郭义强, 刘磊, 高璇, 张家诚, 朱瑜, 张雪梅 (2019). 气候变化对“山水林田湖草”重大生态工程的影响. 生态学报, 39, 8780–8788.]
- Zheng HL, Fang SF, Liu CC, Wu JH, Du JQ (2019). Dynamics of monthly vegetation activity and its responses to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geo-information Science*, 21, 201–214. [郑海亮, 房世峰, 刘成程, 吴金华, 杜加强 (2019). 青藏高原月NDVI时空动态变化及其对气候变化的响应. 地球信息科学学报, 21, 201–214.]
- Zheng Y, Han J, Huang Y, Fassnacht SR, Xie S, Lv E, Chen M (2018). Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*, 92, 18–29.

责任编辑: 李镇清 编辑: 赵航