

· 研究报告 ·

辽宁省植被生长季NDVI对气候因子的响应

曹永强*, 张亮亮, 袁立婷

辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

摘要 基于2000–2010年辽宁省内的37个气象站及周边5个气象站的基础数据, 结合MODIS NDVI的遥感影像资料, 运用趋势分析、相关分析和空间分析等方法研究植被生长与气候的关系, 探讨不同气候因子对植被生长的影响与主导作用。结果表明: (1) 辽宁省植被在研究时段内的7–8月生长最为旺盛, 生长季植被NDVI呈显著升高趋势, 2007年后维持在0.73–0.74之间; (2) 在研究时段内, 整个生长季植被NDVI与降水量和日照时数主要呈正相关, 与气温主要呈负相关, 且在6–8月相关性较为显著, 植被生长对气温的变化最敏感, 对日照的响应最缓慢; (3) 5月辽宁省东部植被生长的主要气候影响因子为气温和日照, 西部为降水, 6–8月东部植被主要气候影响因子则转为降水和日照, 9月再度转为气温和日照; (4) 气温和日照对植被影响的滞后时间由东北向西南逐渐延长, 降水则与之相反。

关键词 NDVI, 气候因子, 响应分析, 滞后期

曹永强, 张亮亮, 袁立婷 (2018). 辽宁省植被生长季NDVI对气候因子的响应. 植物学报 53, 82–93.

植被作为陆地生态系统中最活跃的因素, 其健康状况与人类的生存和发展息息相关。伴随着全球气候的不断变化, 植物物候也会有所改变, 气候对生态系统尤其是对地表植被的影响已引起人们的广泛关注。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)可以定量表征植被的生长情况。利用遥感监测可以从不同时空尺度获取植被的变化特征(Badeck et al., 2004; Reed and Brown, 2005)。将植被特征与气候因子结合进行深入分析, 揭示植被-气候间的内在联系(Blazkova and Beven, 2004; Pet-torelli et al., 2005), 将有助于把握陆地生态系统变化的气候驱动作用。

在我国, 植被覆盖及其与气候因子的关系研究主要集中在东北、华北和西北生态环境较脆弱的干旱半干旱地区(毛德华等, 2010; 杨尚武和张勃, 2014; 赵舒怡等, 2015)。崔林丽等(2009)研究表明, 中国东部NDVI对气温的响应大于降水。吴喜芳等(2015)在黄河源区进行的研究也表明, 植被覆盖对气温变化的响应更加敏感。白云俊等(2016)系统总结了华北上新世-更新世过渡期的植被、气候与大气CO₂的研究进展。谢淦等(2016)在分析北京地区全新世植被气候变化

中指出, 植被演替反映的湿润度变化与季风区其它地区变化趋势一致。刘宪锋等(2015a)阐释了2000–2014年秦巴山区植被覆盖的时空变化及其驱动因素, 指出植被覆盖变化的原因一方面是降水减少, 另一方面是人类活动的影响。此外, White等(2009)和穆少杰等(2012)的研究表明, 植被覆盖受地理位置和水热组合条件等因素的共同影响, 其与气候间的互馈关系并非固定不变。

辽宁省地处东北地区, 受海洋性气候和大陆性季风气候的共同影响。该地区光照与水热条件的空间组合规律相对于北方的内蒙古、甘肃和新疆等地更具典型性。我们选取了气温、降水和日照时数为主要气候因子, 结合辽宁省植被生长季的MODIS NDVI影像数据, 探讨研究区气候变化与植被生长的内在联系, 以期揭示该区域植被生长的规律特征及其气候驱动机制。

1 研究区概况

辽宁省位于我国东北地区的东南部(118°53'–125°46'E; 38°43'–43°26'N), 濒临黄海和渤海, 属温带大陆性

收稿日期: 2017-01-14; 接受日期: 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(No.51579126, No.51779114)和水沙科学与水利水电工程国家重点实验室2015年对外开放基金(No.sklhse-2016-A-02)

* 通讯作者。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

季风气候。辽东半岛南部具有海洋性气候特点,雨热同季且日照丰富,但降水分布时空不均。辽宁省东部和西南部地区植被以林地为主,北部和中部平原区以耕地(玉米(*Zea mays*)和水稻(*Oryza sativa*)等粮食作物,玉米有抚育18、丹玉605号和铁研38等46个品种,水稻有辽星21、美锋1号和辽优1498等19个品种)为主,草地主要集中在西南部,但覆盖面积相对较小。

本研究所用气象数据来源于中国气象数据网。选取省内数据完整且分布较为均匀的37个气象台站及周边5个气象台站植被生长季(5–9月)的气温、降水、日照时数的逐日资料生成月度数据。NDVI数据来源于地理空间数据云提供的2000–2010年月合成产品(该产品由MODND1D计算得到,计算方法为月内最大值合成法,空间分辨率为1 km,时间分辨率为月)。选取的气象站点空间分布情况如图1所示。

2 研究方法

2.1 趋势分析与空间分析

本文采用线性与多项式拟合法(魏凤英, 2007)描述辽宁省植被生长与月平均气温、降水量和日照时数的趋势变化,并将NDVI趋势性与各气象因子的趋势性进行对比,判断研究区整体植被NDVI与气候因子的相互关系,及在后续的空间分析过程中予以对比验证。为揭示空间差异性,利用反距离权重空间插值法(孔云峰和全文伟, 2008)实现研究区植被生长与气候因子相关性的空间展布。

2.2 相关性分析

为了提高相关分析的准确性,我们在ArcGIS平台下以气象站点位置为中心,建立了方圆3 km的缓冲区,并将NDVI栅格影像做矢量化处理,提取缓冲区内的平均NDVI值来代表相应气象站影响区域内的植被覆盖程度,在此基础上利用皮尔逊(Pearson)相关系数分析两者的相关性。计算公式如下:

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

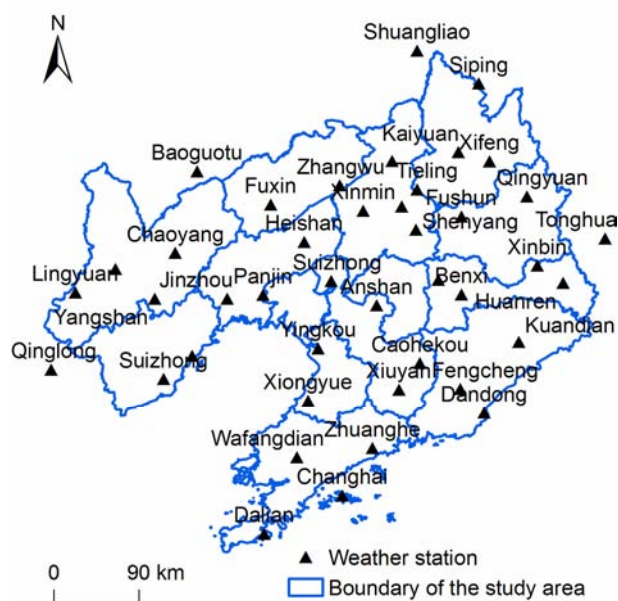


图1 辽宁省气象站点的空间分布

Figure 1 Distribution of meteorological stations in Liaoning province

式中, r 为相关系数, x 、 y 为变量, n 为样本数, 分母为 x 、 y 的标准差, 分子为协方差(薛薇, 2014; 何慧娟等, 2016)。

2.3 滞后系数

植被NDVI对气候变化具敏感性(齐述华等, 2004; 张景华等, 2015)。而在特定的水热组合条件下, 植被对气候变化可能还具有一定的适应性, 即植被对气候变化的响应可能存在滞后效应。我们利用滞后相关系数分析辽宁省植被生长季NDVI对气候响应的滞后期, 数学表达式如下:

$$R = \max\{R_0, R_1, R_2, \dots, R_{n-1}, R_n\} \quad (2)$$

式中, R 为滞后相关系数, n 为样本量。 $R_0, R_1, R_2, \dots, R_n$ 分别为NDVI与当前月、前推1个月, 2个月至前推 n 个月的滞后系数。若 $R=R_n$, 则NDVI对该气候因子变化响应的滞后期为 n 月。

3 结果与讨论

3.1 植被NDVI及气候因子的变化趋势

3.1.1 植被NDVI的变化趋势

图2A为2000–2010年植被生长季月平均NDVI曲线变

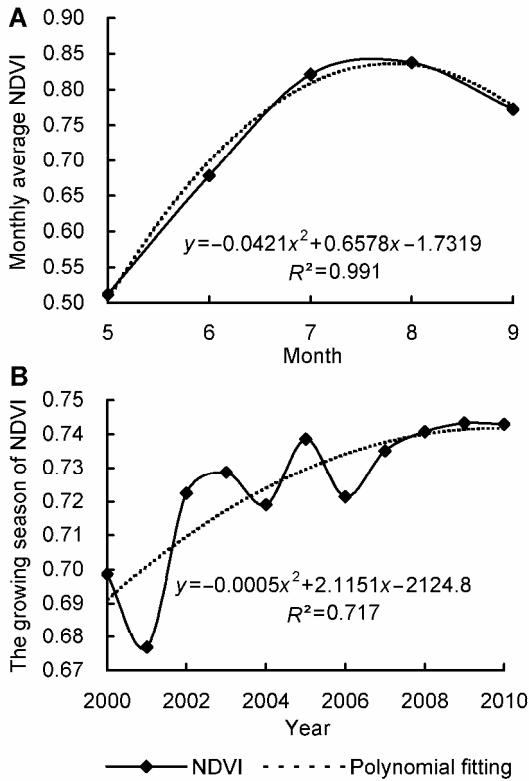


图2 植被生长季的月平均NDVI (A)和年际NDVI (B)趋势变化

Figure 2 Monthly average NDVI (A) and interannual NDVI (B) trend changes in vegetation growing season

化图。从图2A可以看出, 5-7月, 月均NDVI值线性上升趋势明显, 说明这一阶段是辽宁省植被的快速生长期; 7-8月间植被长势最好, NDVI最大值为0.84; 8-9月平均NDVI值呈下降趋势, 表明植被生长出现衰退现象。整体来看, 5-9月的月均NDVI呈抛物线状, 二项式模型的拟合优度 R^2 为0.991, 拟合度良好。从年际间植被生长季的平均NDVI变化来看(图2B), 研究时段内植被NDVI整体呈上升趋势, 期间虽有波动但趋势性比较显著; 2001年年均NDVI值最小, 这主要是由于该年辽宁省出现严重干旱, 农作物受灾严重所致。此后, 随着旱情逐渐缓解以及抗旱减灾和城市绿化等工作不断开展, 植被覆盖度逐渐增大。2007年后, 植被NDVI的变化趋于平稳上升状态, NDVI值维持在0.73-0.74之间。

3.1.2 气候因子的变化趋势

图3A显示, 研究时段内植被生长季月均温整体呈下

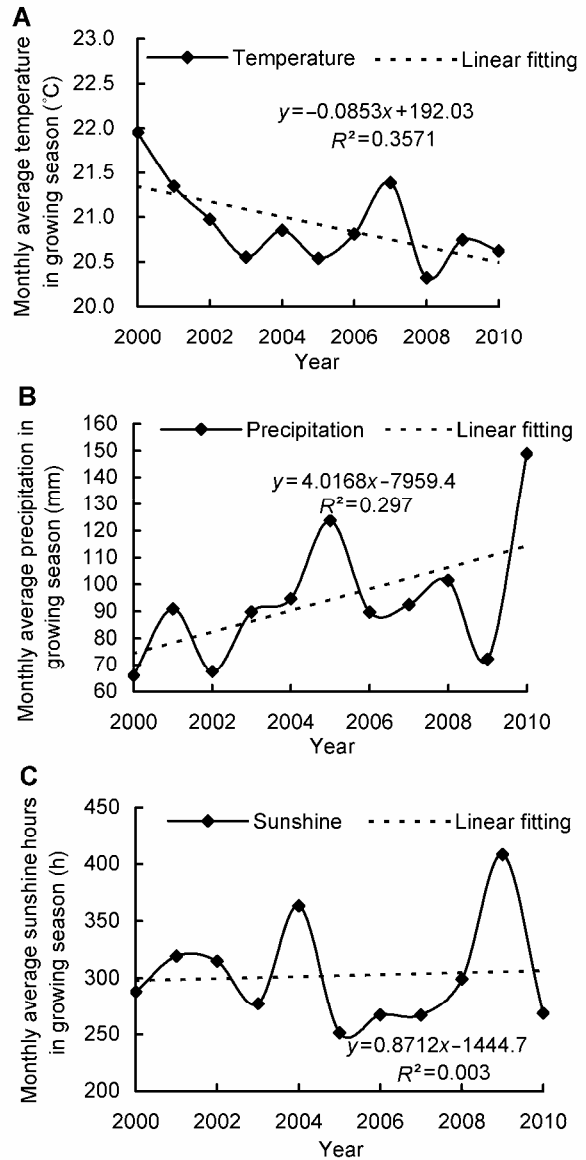


图3 气候因子的趋势变化

(A) 植被生长季的月平均温度; (B) 植被生长季的月平均降雨量; (C) 植被生长季的月平均日照时数

Figure 3 Trend change of climatic factors

(A) Monthly average temperature in growing season; (B) Monthly average precipitation in growing season; (C) Monthly average sunshine hours in growing season

降趋势, 与安佑志(2014)对我国北部地区的研究结果一致, 变化倾向率为 $0.85^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 除2007年前后有短时间回温现象外, 其余时段均呈不同程度的下降趋势。从月均温变化曲线来看, 可大致分为2个阶段: 2000-2003年为显著下降阶段, 月均温由 21.95°C 下

降到20.55°C; 2003–2010年为波动下降阶段, 个别年度月均温有所回升。生长季各月降水量的变化趋势大体呈现与月均温相反(图3B)的上升趋势(变化倾向率为40.16 mm·(10a)⁻¹)。降水量的变化曲线可分为3个阶段: 2000–2005年为波动上升阶段, 月降水量由65.96 mm上升到123.68 mm; 2005–2009年月降水量在波动变化中由123.68 mm回落到72.18 mm; 2009–2010年月降水量由72.18 mm上升到148.93 mm。图3C显示生长季日照时数的趋势变化, 变化倾向率为8.71 h·(10a)⁻¹。2000–2004年日照时数呈波动上升, 2005年回落, 2009年再次回升, 2010年又明显回落。整体来看, 日照时数年际间变化相比气温和降水量变化波动性更强烈。

3.2 植被NDVI与气候因子的相关性

3.2.1 植被NDVI与月平均气温变化相关性的空间展布

辽宁省植被生长季月平均气温与植被NDVI的相关系数的空间分布情况如图4所示。从图4可以看出, 辽宁省月平均气温与植被NDVI的相关性在5月表现为: 中、西部地区主要呈负相关, 东部地区普遍呈正相关(其中清原、新宾、本溪、草河口、凤城和丹东以东的部分地区呈显著正相关, $P<0.05$), 整体来看呈正相关的面积(表1)约占省域陆地面积的47.96%。6–8月的平均气温与植被NDVI呈负相关, 这与刘玲玲等(2012)研究得出的气温对植被生长影响的有关研究结论一致, 表明上述3个月的月平均气温对植被生长起负反馈调节作用。此外, 由表1可知, 6–8月呈负相关的区域面积占比分别为99.23%、96.02%和99.68%。

另外, 从显著性水平的空间分布来看, 6月, 西丰、清原、抚顺、本溪中部、羊山、熊岳以及大连南部地区的负相关关系比较显著($P<0.05$, 面积占比为8.98%)。7月, 辽西北地区的凌源、羊山、朝阳和阜

新等地的负相关关系较为显著($P<0.05$, 面积占比为21.77%), 局部区域甚至达极显著水平($P<0.01$)。8月, 中东部地区的负相关关系显著($P<0.05$, 面积占省域面积的53.38%)。9月, 中西部地区仍以负相关关系为主, 但东部地区已开始表现为正相关关系, 表明随着气温的整体降低, 月平均气温对植被生长的促进作用再次凸显。整体来看, 辽宁省植被生长季NDVI对气温变化的响应主要以负相关为主, 但显著性水平在空间分布上有差异, 6–8月显著性水平较高。

3.2.2 植被NDVI与月平均降水变化相关性的空间展布

辽宁省植被生长季的月降水量与植被NDVI响应关系的空间分布特征如图5所示。植被生长季各月降水量与植被NDVI的相关性较为复杂, 主要在辽西北地区呈正相关。5月, 两者在东部地区主要呈负相关, 清原、抚顺和本溪以东地区的负相关关系显著。此外, 从表2可以看出, 该部分地区两者呈显著负相关的控制范围约占全省面积的10.76%, 其余大部分地区在这一时期的降水量对植被生长具促进作用, 但整体显著性水平不高。6月, 降水量与NDVI之间主要呈负相关, 控制范围约占全省陆地面积的72.72%, 但大部分地区显著性不高; 7月, 东部地区二者表现为负相关, 而中西部地区以正相关为主, 绥中、兴城、盘锦以东地区、新民、康平和西丰等地的局部地区差异显著($P<0.05$), 其它地区均不显著; 8月和9月, 月降水量与NDVI的正相关关系凸显(面积占比分别为65.76%和98.17%), 中部地区在8月呈正相关, 9月, 全省范围内均呈不同程度的正相关性, 并且显著性较高, 具体位置在朝阳、阜新、新民、盘锦、锦州、沈阳、鞍山和营口一带, 局部地区差异极显著($P<0.01$)。总体来看, 降水对研究区植被生长主要呈正相关, 但显著性总体不高, 且存在明显的空间差异性。这主要是由

表1 气温与植被NDVI的相关系数分级和面积占比

Table 1 The correlation coefficient grade of temperature and NDVI and its area proportion

Month	The correlation coefficient grade						
	<-0.68 (%)	-0.68– -0.50 (%)	-0.50–0.50 (%)	0.50–0.68 (%)	>0.68 (%)	<0 (%)	>0 (%)
5	0.03	0.59	83.93	14.93	0.52	52.04	47.96
6	0.15	8.83	91.01	0.00	0.00	99.23	0.77
7	10.65	11.12	78.23	0.00	0.00	96.02	3.98
8	6.00	47.38	46.62	0.00	0.00	99.68	0.32
9	0.00	2.10	97.90	0.00	0.00	69.06	30.94

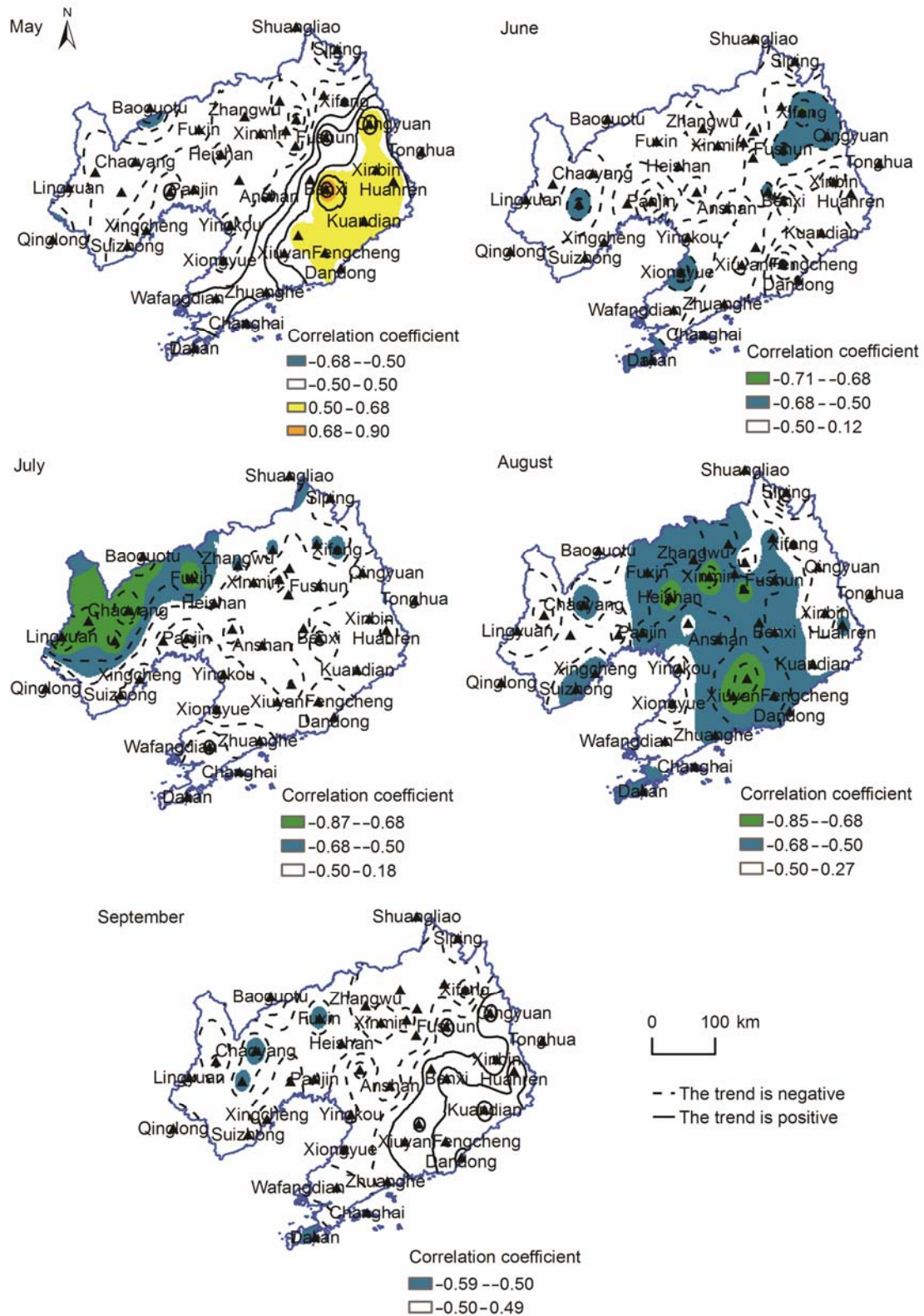


图4 气温与植被NDVI相关性的空间展布

Figure 4 Spatial distribution of correlation between temperature and NDVI

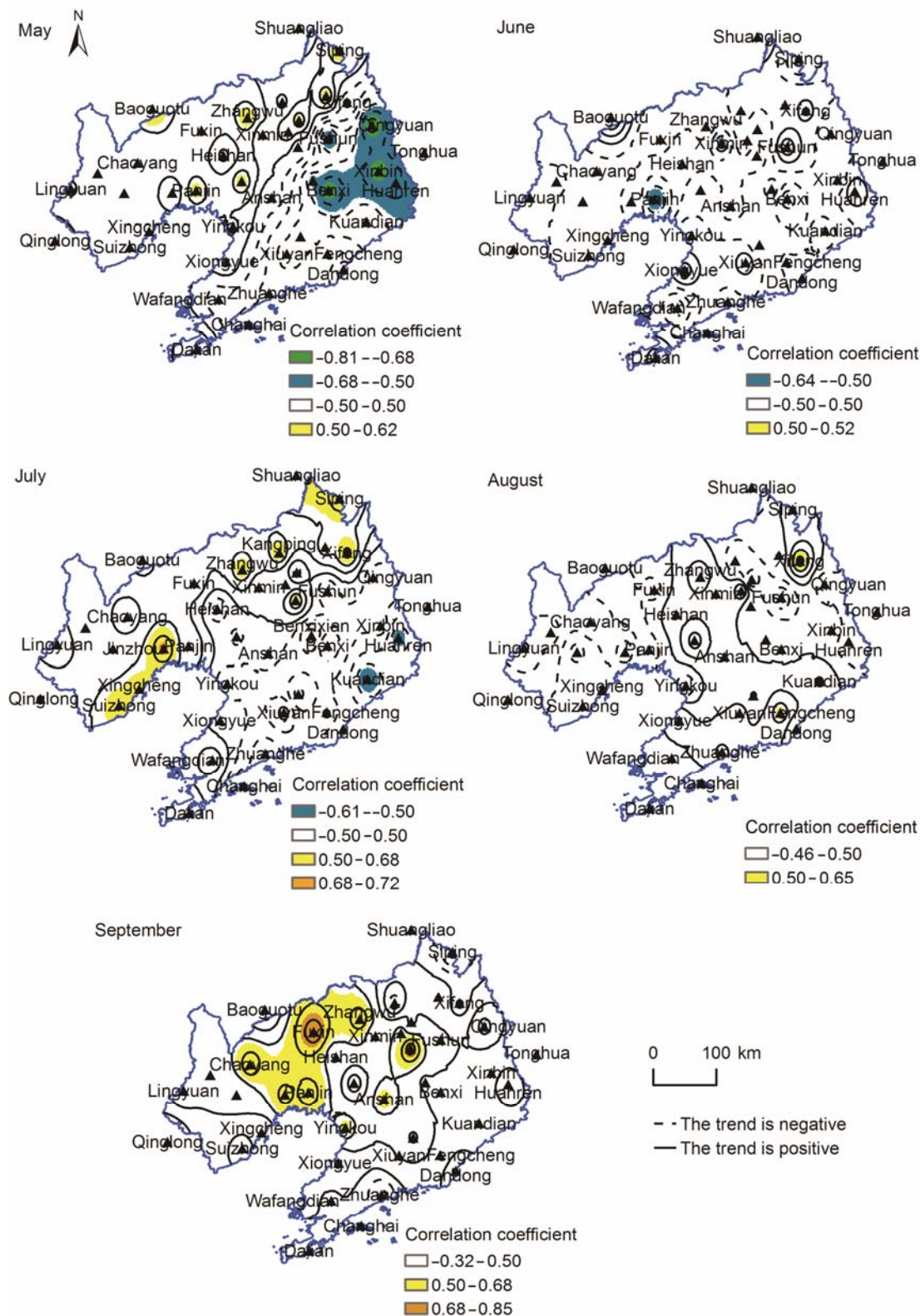


图5 降水量与植被NDVI相关性的空间展布

Figure 5 Spatial distribution of correlation between precipitation and NDVI

表2 降水量与植被NDVI的相关系数分级和面积占比**Table 2** The correlation coefficient grade of precipitation and NDVI and its area proportion

Month	The correlation coefficient grade						
	<-0.68 (%)	-0.68--0.50 (%)	-0.50-0.50 (%)	0.50-0.68 (%)	>0.68 (%)	<0 (%)	>0 (%)
5	1.29	9.47	87.70	1.54	0.00	37.08	62.92
6	0.00	0.57	99.42	0.00	0.00	72.72	27.28
7	0.00	0.80	92.92	6.12	0.15	31.15	68.85
8	0.00	0.00	99.52	0.48	0.00	34.24	65.76
9	0.00	0.00	84.54	13.99	1.47	1.83	98.17

于辽宁省属干旱半干旱地区, 辽西北常年处于干旱状态, 降水量多少直接影响植被的生长状况, 东部地区植被生长季的降水量相对较多, 但也多低于600 mm, 加之植被生长过程对水分要求较多, 因此在该地区降水对植被的生长主要起促进作用。

3.2.3 植被NDVI与月平均日照时数变化相关性的空间展布

辽宁省植被生长季日照时数与植被NDVI的相关性空间分布如图6所示。与月平均气温及降水量相比, 整个生长季日照时数与植被NDVI的相关性相对较弱, 呈显著相关的区域范围减少。从表3可以看出, 5月呈显著正相关的区域面积最大, 但也仅占省域面积的3.37%。但是, 正负相关性的空间分布差异比较均一, 5月、6月、8月以正相关关系为主(8月呈正相关的区域范围最大), 9月呈负相关的区域范围最大。其中, 5-7月呈正相关的区域主要集中在中东部地区, 8月则开始向东北地区延伸, 9月除了朝阳西北部以及辽中地区呈正相关外, 其余地区均呈不同程度的负相关, 局部地区差异显著($P < 0.05$)。

3.2.4 植被动态变化的主导气候驱动因子识别

气温、降水和日照时数等气候因子对植被生长的影响具有综合性, 故很难将其中之一与其它影响因子割裂开来。各气候因子在植被生长的初期、中期和末期与NDVI的相关性及其贡献大小却又存在差异。综合前文对月平均气温、降水量和日照时数3个主要气候因子与植被生长季NDVI相关性的逐月空间分布情况, 可知若按植被对单一气候因子变化响应关系大小, 则其整体表现为气温>降水>日照时数, 与崔林丽等(2009)对中国大陆东部地区的概括性研究结果一致。

5月, 辽宁省植被生长受气温、降水和日照时数

三者的综合影响且在空间分布上有所区别。通过对比其与植被NDVI正负相关性的空间分布, 发现东部地区的气温和日照时数为主要气候影响因子, 西部地区的降水量为主导气候影响因子。这是由于东部地区降水相对丰富, 多年累积的土壤含水量也较为充足, 当气温明显回升, 日照时数显著增多时, 即可达到植被生长发育所需的自然条件。与之相对的西部地区降水量偏少, 但日照时数及气温的累积水平相对偏高, 长时间的累计效应已使该地区的植被生长适应这一自然环境, 降水量少加之春季蒸发量大, 当温度与光照条件达到植被生长的临界条件时, 水分条件则直接成为该地区植被生长发育的主要限制因素。

6-8月, 省域范围内植被生长的主导气候影响因子为降水量和日照时数, 且空间分异性不明显, 气温对这一时期的植被生长则主要表现为负反馈调节作用。9月, 植被生长的主要影响因子为气温和日照时数, 可能由于植被长势较8月有所下降, 故尽管降水量比较充足但该时期的气温及日照时数相对降低, 最终导致植被生长开始呈现衰退迹象。

3.3 植被NDVI对气候因子变化响应的时滞效应

为进一步研究植被NDVI对气候因子响应的滞后性, 分别计算3个气候因子对植被NDVI响应的滞后系数。具体方法为: 选取植被生长最旺盛的8月为基准, 根据公式2分别计算当前月与前推1-3个月的NDVI与气候因子的相关系数, 选取最大值对应的前推时间作为相应的滞后期, 并利用反距离权重空间插值法分析其空间分布状态, 结果如图7所示。

从滞后期的时间长短看, 气温(图7A)、降水量(图7B)和日照时数(图7C)对植被NDVI的平均滞后期分别为0.73、1.19和1.64个月。这进一步表明, 植被生长对气温的变化最为敏感, 其次是降水量, 而对日照

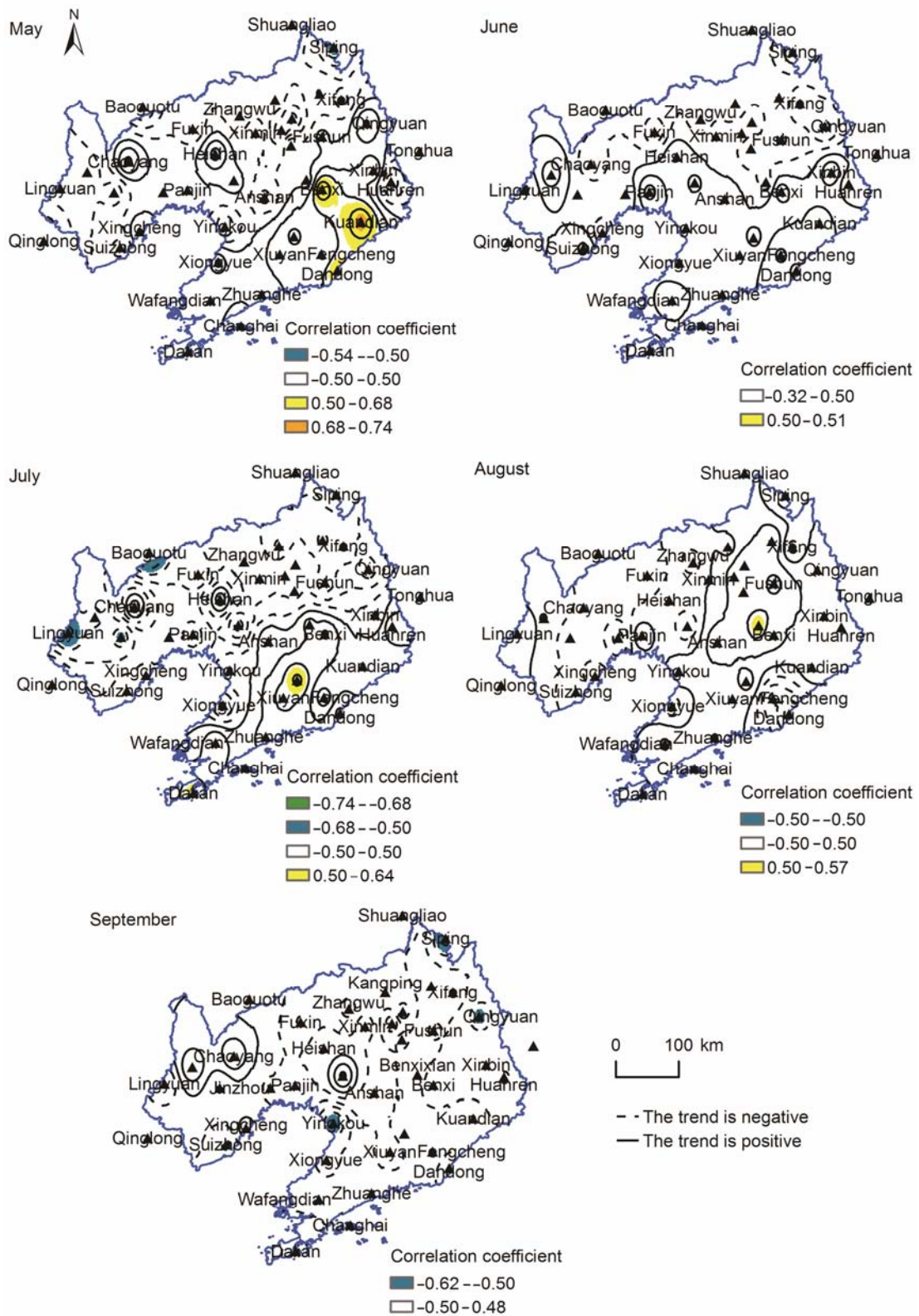
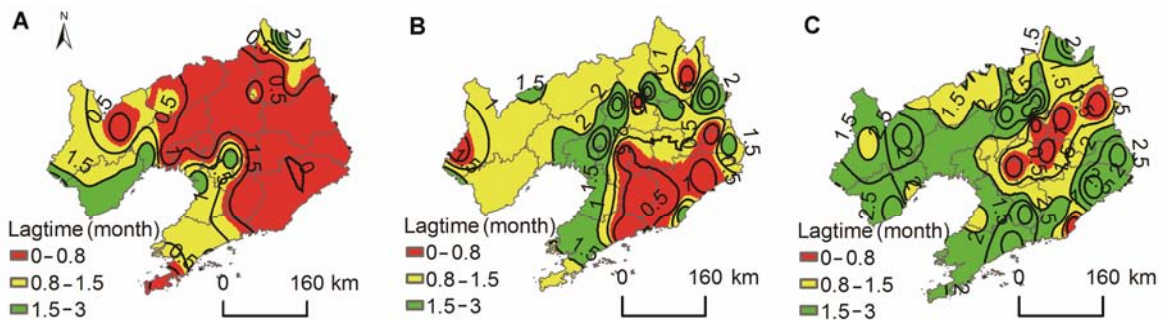


图6 日照时数与植被NDVI相关性的空间展布

Figure 6 Spatial distribution of correlation between sunshine hours and NDVI

表3 日照时数与植被NDVI的相关系数分级和面积占比**Table 3** The correlation coefficient grade of sunshine hours and NDVI and its area proportion

Month	The correlation coefficient grade						
	<-0.68 (%)	-0.68--0.50 (%)	-0.50-0.50 (%)	0.50-0.68 (%)	>0.68 (%)	<0 (%)	>0 (%)
5	0.00	0.12	96.51	3.04	0.33	39.51	60.49
6	0.00	0.00	99.99	0.01	0.00	27.95	72.05
7	0.05	1.17	97.90	0.88	0.00	60.99	39.01
8	0.00	0.01	99.67	0.32	0.00	21.30	78.70
9	0.00	0.85	99.15	0.00	0.00	73.82	26.18

**图7** 植被NDVI对气候因子响应滞后期的空间分布

(A) 气温; (B) 降水量; (C) 日照时数

Figure 7 The spatial distribution of lag time for NDVI response to climatic factors

(A) Temperature; (B) Precipitation; (C) Sunshine hours

时数变化的响应相对缓慢。其原因主要是由于尽管水热条件共同影响植被的生育过程,但光照条件对植被生长的影响需要一定的时间累积,并且其对不同种植被类型的影响差异较大。研究区内喜日照植被每天所需光照时数为14–17小时,其它植被每天所需日照时数约为8小时。从滞后期的空间分布来看,植被生长对气温和日照时数响应的滞后时间由东北向西南逐渐延长;与之相反,降水量则表现为东北部滞后时间长,西南部滞后时间短,原因是不同植被类型对不同气候因子变化的响应存在差异,从而导致滞后期空间分布上的差异。从等值线的空间分布情况看,在气温对植被生长的影响由东北向西南滞后期延长的同时,其变率相对加快;降水量对植被生长影响的变率则表现为由西向东逐渐加快;与前述两者不同,日照时数对植被生长的影响变率具有空间同质性,区域分布差异不明显。

3.4 讨论

(1) 本研究基于统计分析与GIS空间分析方法辨识了

辽宁省植被动态变化过程的气候驱动因子。在分析各气候因子对植被生长的驱动作用时,结合植被实际生长情况,且更加注重所选气候因子的综合影响与某种气候因子的主导作用。由于辽宁省独特的气候特点,本研究结果与其它地区已有的研究结论存在一定差异。例如,辽宁省植被生长最旺盛的月份为7–8月,略早于三江源地区NDVI最大值出现的时间(李辉霞等, 2011),体现了纬度、海拔及海陆位置对两地水热条件影响的差异,进一步导致植被生育过程存在一些差别。

(2) 辽宁省植被生长季气温对该地区植被生长主要起胁迫作用。通过分析发现,研究时段内植被生长季多年平均气温为20.92°C, 6–8月气温也均超过20°C (分别为21.69°C、24.09°C和23.31°C), 5月与9月均低于20°C。根据崔耀平等(2012)的研究结果,辽宁省植被生长最适温度应在18–20°C之间,故此气温在生长季多年平均水平下,已超过了植被生长的最适温度,且在6–8月更为突出,造成了该地区生长季气温对植被生长以负反馈调节为主。此外,刘正佳等(2014)的研究表明,辽宁省东部地区主要植被类型

(如落叶阔叶林和针叶林)的生长适宜温度也均低于20°C, 混交林生长适宜温度在20°C左右, 这也是9月随着气温的下降, 其对辽宁省东部植被生长再次出现促进作用的主要原因。

(3) 除气候条件变化的制约外, 人为因素对植被生长也会产生一定的影响。从辽宁省统计年鉴记录的数据来看, 研究时段内辽宁省植树造林面积在2000–2006年逐年减少; 2006年开展封山育林工作, 造林面积逐年增加。研究时段内辽宁省木材采运量基本维持在 $1.40 \times 10^6 \text{ m}^3$ 左右, 这些因素无疑也影响了研究区植被的覆盖程度。然而, 虽然植被生长受气候条件和人类活动的双重影响, 但主要制约因素是气候条件的改变, 人类活动只在局部地区会产生较大作用(郭敏杰, 2014)。刘宪锋等(2015b)在对我国植被覆盖时空变化趋势的研究中也得出了类似的结论。

(4) 本研究结果表明, 辽宁省植被覆盖有了一定的改善, 一方面与该地气候变化有利于植被的生长有关(降水量增多, 植被生长季均温回落); 另一方面与人类加大了对生态环境保护的投入有关。然而气候条件的改变具有不可控性, 若要促使植被生态过程的进一步好转就需人为干预这一过程。例如, 进一步整治与完善人工渠系, 外调辽东丰沛水区的可利用水资源, 可一定程度上改变水量在空间上的分配格局, 使辽宁省西北部地区的植被生态用水得到保障。

4 结论

(1) 研究时段内, 辽宁省植被在5–7月生长迅速, 7–8月生长最旺盛, 9月长势相对减弱; 年际间植被NDVI呈现逐渐增大的趋势, 2007年后NDVI值维持在0.73–0.74之间; 生长季平均气温呈现显著降低的趋势, 降水量显著增多; 生长季植被NDVI与平均气温呈负相关, 与降水及日照时数呈正相关。

(2) 从植被-气候相关性的显著程度来看, 研究时段内植被生长与气温的相关性最显著, 与日照时数的相关性最低。5月, 东部地区植被生长的主要气候影响因子为气温和日照, 西部地区的主导气候因子为降水量; 6–8月, 主要气候影响因子为降水量和日照时数; 9月, 植被生长的主要气候影响因子为气温和日照时数。

(3) 研究时段内, 植被生长对气温的变化最敏感,

对日照时数的响应速度最缓慢; 从空间来看, 植被对气温和日照时数响应的滞后时间表现为由东北向西南逐渐延长, 对降水量的响应速度与前二者相反; 气温对植被生长的影响变率由东北向西南逐渐加快, 降水量对植被生长影响的变率则表现为由西向东逐渐加快, 而日照时数对植被生长的影响变率在空间分布上具均一性。

参考文献

- 安佑志 (2014). 基于遥感的中国北部植被NDVI和物候变化研究. 博士论文. 上海: 华东师范大学. pp. 33–36.
- 白云俊, 魏雪苹, 秦锋, 李亚蒙, 李金锋, Ranhotra PS, 王宇飞 (2016). 华北上新世-更新世过渡期植被、气候与大气CO₂研究进展. 植物学报 51, 257–264.
- 崔林丽, 史军, 杨引明, 范文义 (2009). 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征. 地理学报 64, 850–860.
- 崔耀平, 刘纪远, 胡云锋, 邢龙飞, 陶福祿, 王军邦 (2012). 中国植被生长的最适温度估算与分析. 自然资源学报 27, 281–292.
- 郭敏杰 (2014). 基于NDVI的黄土高原地区植被覆盖度对气候变化响应及定量分析. 硕士论文. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心). pp. 8.
- 何慧娟, 卓静, 王娟, 董金芳, 权文婷 (2016). 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系. 生态学报 36, 439–447.
- 孔云峰, 全文伟 (2008). 降雨量地面观测数据空间探索与插值方法探讨. 地理研究 27, 1097–1108.
- 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰 (2011). 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报 31, 5495–5504.
- 刘玲玲, 刘良云, 胡勇 (2012). 1982–2006年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析. 地理科学进展 31, 1433–1442.
- 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双 (2015a). 2000–2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报 70, 705–716.
- 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周 (2015b). 1982–2012年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报 35, 5331–5342.
- 刘正佳, 刘纪远, 邵全琴 (2014). 不同土地覆盖类型上植被生长的最适温度. 地球信息科学学报 16, 1–7.
- 毛德华, 王宗明, 罗玲, 宋开山, 刘殿玮, 张柏, 宋长春

- (2010). 1982–2008年东北冻土区植被生长季NDVI对气候变化和CO₂体积分数增加的响应. 环境科学学报 **30**, 2332–2343.
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民 (2012). 2001–2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报 **67**, 1255–1268.
- 齐述华, 王长耀, 牛铮, 刘正军 (2004). 利用NDVI时间序列数据分析植被长势对气候因子的响应. 地理科学进展 **23** (3), 91–99.
- 魏凤英 (2007). 现代气候统计诊断与预测技术(第2版). 北京: 气象出版社. pp. 36–41.
- 吴喜芳, 李改欣, 潘学鹏, 王彦芳, 张莎, 刘峰贵, 沈彦俊 (2015). 黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究. 资源科学 **37**, 512–521.
- 谢淦, 白加德, 徐景先, 郝慧, 李金锋, 姚轶锋, 张林源, 李承森, 杨健, 王宇飞 (2016). 北京地区全新世植被和气候变化研究进展. 植物学报 **51**, 872–881.
- 薛薇 (2014). 基于SPSS的数据分析(第3版). 北京: 中国人民大学出版社. pp. 270–276.
- 杨尚武, 张勃 (2014). 基于SPOT NDVI的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应. 生态学杂志 **33**, 455–461.
- 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭 (2015). 澜沧江流域植被NDVI与气候因子的相关性分析. 自然资源学报 **30**, 1425–1435.
- 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖 (2015). 2001–2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. 地理学报 **70**, 717–729.
- Badeck FW, Bondeau A, Böttcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S (2004). Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol* **162**, 295–309.
- Blazkova S, Beven K (2004). Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *J Hydrol* **292**, 153–172.
- Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard JM, Tucker CJ, Stenseth NC (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol Evol* **20**, 503–510.
- Reed BC, Brown JF (2005). Trend analysis of time-series phenology derived from satellite data. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on the analysis of multi-temporal remote sensing images. Biloxi: IEEE. pp. 166–168.
- White MA, De Beurs KM, Didan K, Inouye DW, Richardson AD, Jensen OP, O’Keefe J, Zhang G, Nemani RR, Van Leeuwen WJD, Brown JF, De Wit A, Schaepman M, Lin XM, Dettinger M, Bailey AS, Kimball J, Schwartz MD, Baldocchi DD, Lee JT, Lauenroth WK (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Glob Chang Biol* **15**, 2335–2359.

Correlation Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Climatic Factors in the Vegetative Growing Season in Liaoning Province

Yongqiang Cao^{*}, Liangliang Zhang, Liting Yuan

School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract Daily data were obtained from 37 meteorological stations in Liaoning province and 5 meteorological stations in an adjacent area, combined with MODIS NDVI data, during 2000–2010. Vegetation growth response to climate change was analyzed by trend, correlation and spatial analyses to investigate the leading influence of different climate factors on vegetation growth. During the study period, the vegetation of Liaoning province was the most vigorous in July and August. NDVI was significantly increased in the vegetative season and remained between 0.73 and 0.74 after 2007. NDVI and temperature were negatively correlated, especially from June to August; NDVI and precipitation and sunshine hours mainly showed a positive correlation. Vegetation growth was most sensitive to changes of temperature, and the response to sunshine hours was the slowest. The main influencing climatic factors were temperature and sunshine hours in May in the eastern part of Liaoning province but changed to precipitation in the western region. During June to August, the main climatic factors were precipitation and sunshine hours but in September, changed to temperature and sunshine hours. The lag time of temperature and sunshine hours to vegetation was extended from the northeast to southwest Liaoning province, and that for precipitation was opposite.

Key words NDVI, climatic factors, response analysis, lag period

Cao YQ, Zhang LL, Yuan LT (2018). Correlation analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) and climatic factors in the vegetative growing season in Liaoning province. *Chin Bull Bot* **53**, 82–93.

* Author for correspondence. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

(责任编辑: 孙冬花)