

气候变暖背景下安徽省月 NDVI 动态变化研究

徐光来^{1, 2} 杨先成^{1, 2} 徐晓华¹ 李爱娟^{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 241003;

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 241003)

【摘要】: 地表植被覆盖时空动态变化能很好地反映气候变化。基于 2000~2016 年 MODISNDVI 逐月数据及同期内格点降水和气温数据, 探讨了安徽省 NDVI 时空变化及其与气象因子的关系, 结果表明: (1) 安徽省 NDVI 呈显著增加的趋势, 全省平均增速为 $5.7 \sim 11.3 \times 10^{-3}/a$, 其中, 旱地增长较快, 阔叶林和灌丛增长较缓。时间上, 除水田外, 10 月至翌年 3 月具有显著增加趋势, 6~9 月增加趋势不明显。空间上, 皖南山区、江淮之间大别山区和淮北平原增长较快; (2) 各种植被类型月均 NDVI 与气温或降水具有相关性。且 NDVI 均为与前一个月的气温或降水相关性最高的时滞特点; (3) 像元尺度 NDVI 与气温的偏相关系数较大, 其中正相关达到 0.01 显著性水平的面积占 92.2%。而与降水的偏相关性较小, 其中正相关达到 0.01 显著性水平的面积仅占 8.2%。月尺度 NDVI 的驱动类型分析结果表明, 气温驱动型占 75.0%, 降水气温共同驱动型占 15.3%。研究结果可为全球变暖背景下区域生态系统管理和保护提供理论参考。

【关键词】: NDVI 时空变化 气候变化 驱动因子

【中图分类号】: X87 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)02-0397-10

作者简介: 徐光来(1978~), 男, 副教授, 主要研究方向为水文学与水资源管理. E-mail: guanglaixu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41301029;41301011)

植被作为土地覆被最敏感、最重要的要素之一, 可以在较短时间内反映气候变化和人类活动过程^[1]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是目前公认的可以很好地反映地表植被覆盖与生长状况的最佳参数之一^[2]。当前关于 NDVI 和气候的关系已开展较多的全球尺度和区域尺度的研究^[3, 4]。Kawabata 等^[5]研究了全球 NDVI 与降水和气温的关系, 由于温度升高, 北半球中高纬度 NDVI 增加。Wang 等^[6]研究了印度洋-太平洋海域上空水汽扩散异常对全球 NDVI 模式的影响。Han 等^[7]研究了河西走廊地区 NDVI 变化与海拔、降水和气温的关系, 海拔和 NDVI 趋势值之间的相关性受降水和气温变化的影响。李晓兵等^[8]的研究表明全国主要植被类型 NDVI 从北到南与气候条件变化的相关系数逐渐降低, 从东南到西北与气候条件变化的相关系数逐渐增加。郭磊等^[9]分析了河南省 1982~2013 年 NDVI 与气象因子的相关性, 年平均 NDVI 与年平均温度一般呈正相关, 两者增减基本同步, 而与年降水量的年际变化存在一定的滞后性。此外, 不同植被类型 NDVI 也开展了较多的研究, 取了一定的研究成果。Chu 等^[10]基于 GIMMSNDVI 数据和格点气象数据研究了黑龙江阿姆河流域 1982~2015 年植被动态及其对气候变化的响应, 生长季 NDVI 主要受降水的调节, 温度是影响春季植被生长的主导因子, 植被生长对气候变化的响应因植被类型而异。Pang 等^[11]研究了青藏高原 NDVI 变化及其对温度和降水量变化的响应, 生长季 NDVI 与温度在季节和月尺度上均呈正相关, 不同植被类型对温度和降水的响应存在季节和空间变化。张智韬等^[12]研究美国农业部南方平原研究中心试验田大豆 NDVI 与气象要素的关系, 结果表明影响农作物大豆不同生育期 NDVI 变化的主要气象因素为太阳辐射和大气温度。程红霞等^[13]研究了北疆农作物棉花

NDVI 与气象因子的相关性, NDVI 能较好地反映棉花长势, 最低气温的积温是影响棉花生长的重要因素。

本研究以安徽省为研究区, 开展不同植被覆盖类型 NDVI 的动态变化及其与气象因子关系的研究。研究内容包括 NDVI 动态变化规律, 不同植被类型 NDVI 与气象因子相关性分析, NDVI 变化的降水、气温气象因子驱动分析。本研究在格网尺度上开展研究, 以期对研究区植被覆盖动态进行遥感监测, 并结合格网内同期气象要素变化分析其驱动因素, 为我国东部区域生态系统的保护提供理论参考。

1 研究区概况

安徽省位于华东地区(114° 54' E~119° 37' E, 29° 41' N~34° 38' N), 地跨长江、淮河、新安江三大流域, 具有淮北平原、江淮丘陵和皖南山区三大自然区域。安徽省地貌类型复杂多样, 其中淮北平原以旱地为主, 江淮之间平原区以水田为主, 江淮之间大别山区和皖南山区以自然植被为主(图 1)。该区气候属暖温带与亚热带的过渡地带, 冬季盛行偏北风; 夏季炎热, 盛行偏南风, 天气变化剧烈, 自然灾害频繁发生。年平均气温为 15.49℃, 年平均降水量为 1195.6mm, 有南多北少, 山区多、平原丘陵少的特点。安徽省作为重要的粮食产区, 气温和降水对其有重要影响^[14]。



图 1 安徽省位置及植被类型

2 数据和方法

2.1 数据源

月 NDVI 数据来自地理空间数据云中国 500MNDVI 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, 时间分辨率为每月, 空间分辨率为 500m, 时间序列为 2000 年 2 月到 2016 年 4 月。MODND1D 是由 MOD09GA 经过拼接、切割、投影转换、单位换算等过程加工而成。中国 1:100 万植被类型空间分布数据和土地利用遥感监测数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率均为 1km。气象数据来源于中国地面降水和气温日值 0.5°×0.5° 格点数据集(V2.0)(<http://data.cma.cn/>), 主要有月降水, 月最高、平均和最低气温等气象因子。该数据集包括由 2474 个国家级台站

的降水日值资料和由全球数字高程模型 (GTOP030) 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。

基于中国 1:100 万植被类型空间分布数据将植被类型分为针叶林、阔叶林、灌丛、草丛和栽培植物等类型, 将其中的栽培植物类型与 2018 年土地利用数据在 ArcGIS 中进行相交 (intersect) 叠加分析, 选出其中的水田和旱地植被类型, 进而得到针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、水田和旱地掩膜。将 6 种植被类型与 5km×5km 格网叠加生成掩膜, 分别提取 NDVI、降水和气温栅格数据, 通过属性表中提取值与不同斑块面积加权平均得到月平均 NDVI、降水和气温数据。

为排除水体和城市用地等非植被因素的干扰, 参考相关文献, 采用大于 0.1 的值作为植被 NDVI 的阈值^[2]。

2.2 相关性分析

为定量描述 NDVI 的变化趋势, 采用其与年份或月份的线性倾向率和相关系数来表征变化量和变化趋势的显著性。利用月 NDVI 与气候因子的 Pearson 线性相关性判断植被与气候因子作用关系的性质和强度。采用偏相关分析排除其他因素的干扰, 分析 NDVI 与单一气象要素的关系。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。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; m 为自变量个数。采用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。

2.3 NDVI 变化驱动力分区

气候变化特别是降水和温度变化, 对陆地植被的生长具有重要影响。参考以往研究^[15~17], 根据 NDVI 与降水、气温的偏相关性显著性水平, NDVI 与降水和气温的复相关性显著性水平, 对安徽省植被 NDVI 变化按照驱动因子不同进行类型分区 (表 1)。

表 1 NDVI 变化驱动力分区准则

NDVI 变化驱动因子	NDVI 变化驱动类型	准则		
		$r_{NDVI-P,T}$	$r_{NDVI-T,P}$	$r_{NDVI-TP}$
气候因子	气温降水强驱动型, $[T+P]^+$	$ t > t_{0.01}$	$ t > t_{0.01}$	$F > F_{\alpha=0.01}$
	降水驱动型, P		$ t > t_{0.01}$	$F > F_{\alpha=0.01}$
	气温驱动型, T	$ t > t_{0.01}$		$F > F_{\alpha=0.01}$
	气温降水弱驱动型, $[T+P]^-$	$ t \leq t_{0.01}$	$ t \leq t_{0.01}$	$F > F_{\alpha=0.01}$
非气候因子	非气候因子驱动型, NC			$F \leq F_{\alpha=0.01}$

3 结果与分析

3.1 不同植被类型 NDVI 时序变化

自然植被 NDVI 值较高, 人工栽培植被 NDVI 变化幅度较大。不同植被类型的 NDVI 均值大小顺序为灌丛、阔叶林、针叶林、草丛、旱地和水田(分别为 0.768、0.766、0.729、0.728、0.669 和 0.633), 水田和旱地 NDVI 月均值变化范围较大(图 2a)。

季节变化方面, 各种植被类型每年 3、5 和 10~12 月 NDVI 值呈极显著增加趋势($P < 0.01$), 7~9 月各种植被类型 NDVI 变化不明显, 其中 9 月所有植被类型 NDVI 均未见显著变化趋势(表 1)。自然植被类型 10 月至翌年 3 月均表现为极显著增加, 草丛、针叶林、灌丛和阔叶林全年大部分月份有增加趋势(分别有 10、9、8 和 7 个月通过 0.05 显著性检验)。水田 10~12、3~5 月达到极显著增加趋势, 旱地 10 月至翌年 5 月达到极显著增加趋势。

自然植被类型 NDVI 年内分布与季节相关呈倒“U”型, 各植被类型 NDVI 最大值的年内分布较一致, 均出现在高温多雨的 7 或 8 月, NDVI 最小值出现在 1 或 2 月。人工栽培作物中旱地受到收割的影响, 6 月的 NDVI 有急剧下降的过程, 且 6 月的 NDVI 值是全年的极小值(图 2b, 2e)。水田在 4~6 月 NDVI 值较平稳, 7 月有急剧增加的过程。

2000~2016 年安徽省 NDVI 呈显著增加的趋势。全省年平均 NDVI 增加速率为 $7.0 \times 10^{-3}/a$ ($R^2=0.84$, $P < 0.01$)。各植被类型 NDVI 均呈显著性增加的趋势, 其中旱地增加速率最大 ($11.3 \times 10^{-3}/a$, $R^2=0.92$, $P < 0.01$), 阔叶林增加速率最小 ($5.6 \times 10^{-3}/a$, $R^2=0.80$, $P < 0.01$) (图 2c, 2d)。

3.2 NDVI 变化的空间分布

对各月的 NDVI 均值进行近 17 年的时间序列分析, 结果如图 3 所示, 1~5 月 NDVI 增加趋势通过 0.01 显著性检验的面积约占总面积的 1/3, 分别约占总面积的 37.6%、26.0%、46.4%、30.6%和 39.5%。1、2 月淮北平原和大别山区增加明显, 3~5 月淮北平原旱地作物区增加明显。

6、7、8、9 月增加趋势通过 0.01 显著性检验的面积占总面积 10%左右, 分别约占总面积的 7.4%、8.3%、10.5%和 7.8%, 增加区主要分布在大别山北部灌溉农业区。具有显著减小趋势($P < 0.05$)的面积分别占 0.5%、1.2%、0.9%和 1.3%。

10、11 和 12 月 NDVI 增加趋势最为明显, 通过 0.01 显著性检验的面积约占 3/4, 分别占总面积的 76.8%、79.8%、和 74.7%。北部淮北平原, 江淮之间大别山区等大部分地区增加明显, 增加趋势相对较缓的是沿长江的平原。

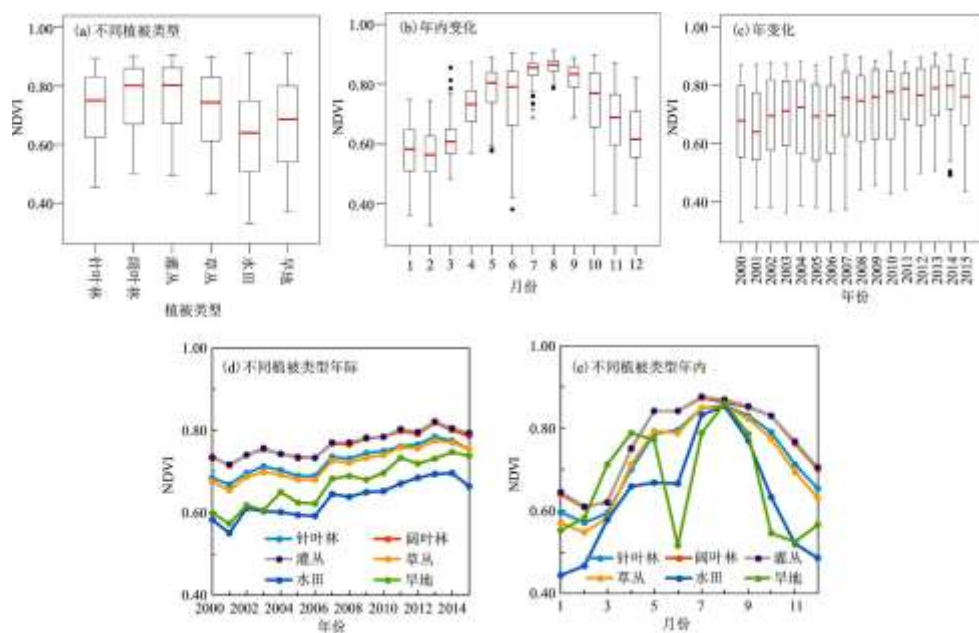


图 2 2000~2016 年安徽省不同植被类型 NDVI 时间序列

表 2 2000~2016 年安徽省各月 NDVI 和年际变化率 ($10^{-3}/a$)

月份	针叶林	阔叶林	灌丛	草丛	水田	旱地
1	**8.8	**9.5	**10.1	**10.1	6.2	**14.9
2	**9.5	**8.7	**9.4	**10.1	*9.0	**14.1
3	**8.9	**8.3	**8.6	**9.7	**10.9	**14.8
4	**6.4	4.8	4.9	**6.6	**8.9	**10.5
5	**6.7	**4.2	**4.8	**6.7	**9.8	**12.6
6	*6.1	5.4	*5.8	*6.8	4.4	3.8
7	2.1	0.8	1.2	*2.2	*2.6	2.6
8	1.1	-0.9	-0.3	1.1	*3.2	3.0
9	1.2	-0.6	0.2	1.6	3.8	4.9
10	**12.4	**8.9	**9.1	**12.5	**19.2	**14.8
11	**14.5	**12.4	**12.9	**14.3	**16.1	**20.8
12	**16.1	**15.8	**16.0	**17.1	**14.1	**19.3
年际	**7.0	**5.7	**6.1	**7.4	**8.4	**11.3

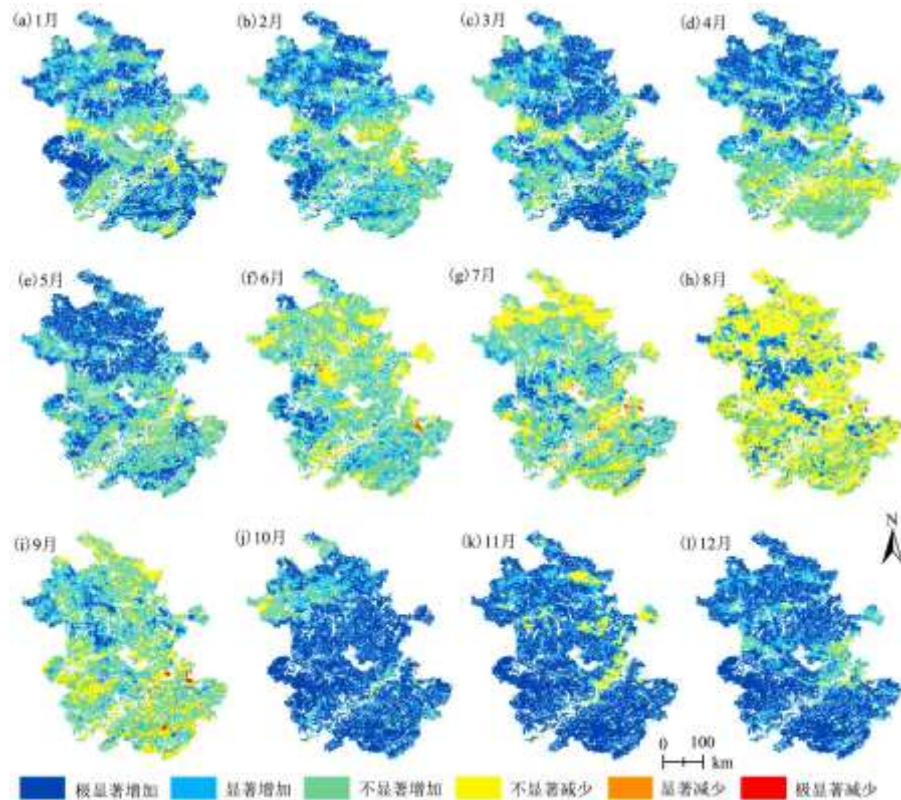


图3 安徽省 2000~2016 年月 NDVI 变化显著性空间分布

注：极显著增加 Significant increase ($P < 0.01$), 显著增加 significant increase ($P < 0.05$), 不显著增加 no significant increase ($P > 0.05$), 不显著减少 no significant decrease ($P > 0.05$), 显著减少 significant decrease ($P < 0.05$), 极显著减少 Significant decrease ($P < 0.01$).

3.3 NDVI 对气候因子的响应

3.3.1 NDVI 与降水和气温因子的相关性和偏相关性

对各种植被类型 NDVI 月均值与相同范围内降水和气温月平均值进行相关性分析, 结果表明, 与降水相关性方面, NDVI 与当月降水量相关性在 0.31~0.56 之间, 其中水田的相关性最高, 各种植被类型均通过了 0.01 的显著性检验。NDVI 与降水相关性的时滞分析表明, 植被 NDVI 与前 1 月的降水相关性最高, 相关性分布大致以前 1 月为极大值呈倒“U”型(图 4a)。与气温相关性方面, NDVI 与当月气温相关性在 0.471~0.85 之间, 均高于与降水的相关性。其中草地和水田最高, 旱地的相关性最差, 各种植被类型均通过了 0.01 的显著性检验。NDVI 与气温相关性的时滞分析表明, 植被 NDVI 与当月或前 1 月的气温相关性最高, 以此随着时间向前推移相关性递减(图 4c)。

对各种植被类型 NDVI 与当月降水量和气温进行偏相关分析, 结果表明 NDVI 与降水的偏相关性在 -0.22~0.11 之间, 针叶林、水田和旱地未达到显著性水平。自然植被与前 1 月至前 5 月降水偏相关性相差不大, 人工植被水田和旱地前 1 月的偏相关性最高, 随时间向前推移相关性递减(图 4b)。NDVI 与当月气温偏相关性在 0.38~0.84 之间, 旱地相关性最低, 各种植被类型均通过了 0.01 的显著性检验。NDVI 与当月气温的偏相关性最高, 随时间向前推移相关性递减(图 4d)。

3.3.2 NDVI 与降水和气温因子相关性的空间分布

像元尺度 NDVI 与降水的相关性 $-0.31\sim0.65$ 之间,江淮之间水田种植区相关性较高,皖南山区和淮北平原相关性较低(图 5a)。NDVI 与降水呈极显著($P<0.01$)正相关的区域面积约占总面积的 80.6%,显著相关($P<0.05$)的面积占 7.0%。像元尺度 NDVI 与气温的相关性 $0.03\sim0.93$ 之间,江淮之间丘陵及皖南山区相关性较高,淮北平原旱地农作物区相关性较低(图 5d)。NDVI 与气温呈极显著正相关($P<0.01$)的区域面积占总面积的 95.2%,显著相关($P<0.05$)的面积占 2.2%。

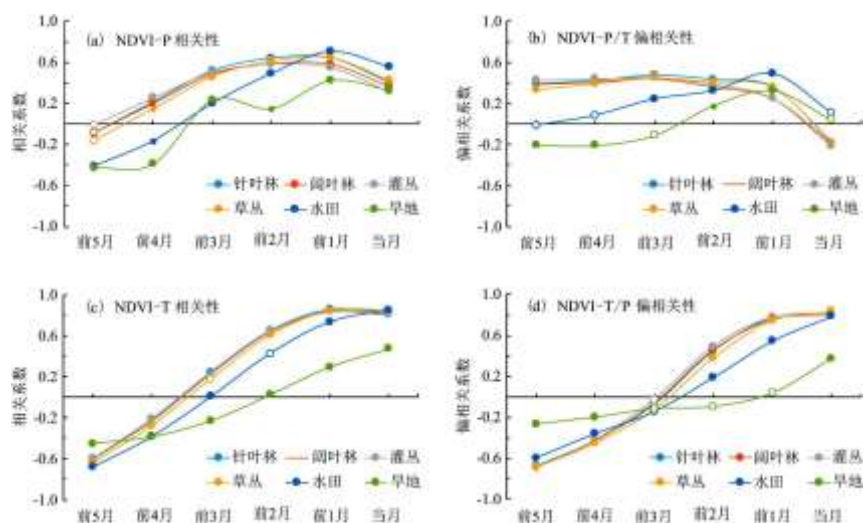


图 4 2000~2016 年 NDVI 月值与气候因子的相关系数和偏相关系数

注: ●为 0.01 水平显著相关, •为 0.05 水平显著相关, ○为无显著相关性。

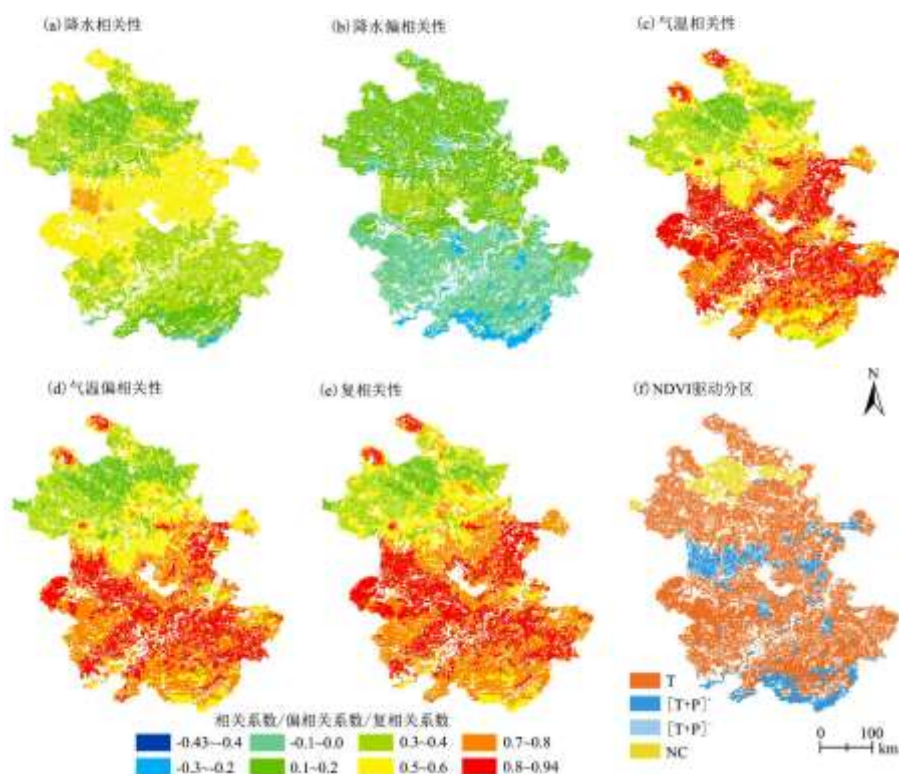


图 5 2000~2016 年 NDVI 与气候因子相关系数、偏相关系数、复相关系数空间分布和驱动因子分区

像元尺度 NDVI 与降水的偏相关性介于 $-0.43 \sim 0.40$ 之间,正、负相关达到极显著水平的面积分别为 8743.5 和 8838.1 km^2 ,均占统计总面积的 8.2%。空间分布上江淮之间相关性较高(图 5b)。NDVI 与气温的偏相关性介于 $-0.05 \sim 0.90$ 之间,相关性达到极显著水平($P < 0.01$)的面积占统计总面积的 92.2%。空间分布上江淮之间丘陵和皖南山地较高(图 5e)。

3.3.3 NDVI 变化驱动分区

像元尺度 NDVI 与降水气温的复相关性介于 0.07~0.94 之间,江淮之间平原丘陵和沿江平原复相关性较高(图 5c)。复相关显著性水平达到 0.01 水平的面积占统计总面积的 92.2%。

从安徽省 NDVI 驱动因素分布图可看出(图 5f),温度驱动型是主要的分区类型,其面积占总面积的 76.4%。气温、降水共同驱动型是次要类型,占总面积的 15.3%,主要分布在大别山区北部和皖南山地部分地区。非降水、气温驱动型占 5.8%,主要分布再皖北中部旱地区。气温、降水弱驱动的地区占 2.5%,无降水驱动型地区。

4 讨论与结论

4.1 讨论

安徽省地处中国东部,属于暖温带向亚热带过渡型气候,地貌类型以平原和丘陵为主。本研究可丰富植被覆盖动态变化及其对气候变化响应研究内容。本文的研究表明,全省及各种植被类型 NDVI 呈显著增加的趋势。这与全球及全国其他地区的研究具有较好的一致性。国内青藏高原地区、河南省、嘉陵江流域等研究表明 NDVI 有增加的趋势^[9,18~20]。在气候变暖的背景下,气温升高带来的积温效应,使植被的生长力增强,NDVI 呈增加的趋势。但也有研究表明 NDVI 相对比较稳定,未见明显的趋势变化^[21,22]。这可能与研究时间段比较短(均不超过 10 年)和单一的草地植被类型有关。

在 NDVI 变化时间上,安徽省 NDVI 冬季增加比较明显,夏季未见显著变化趋势。安徽省 NDVI 增加趋势通过 0.01 显著性检验的面积占比最多的为 10~12 月,最少的为 6~9 月。这与安徽省气温的增加趋势冬季较明显,夏季不明显的研究结果一致^[23]。

安徽省 NDVI 与气温的相关性和偏相关性都高于降水,气温是影响植被覆盖的重要气象因子。以往研究表明,安徽省及所在的长江中下游地区,近 50 年气温呈上升趋势,降水未见明显的趋势^[14,24]。年际尺度 NDVI 与气温呈较强正相关,与降水呈弱负相关^[25]。长江流域植被总体上对气温变化的响应程度大于降水,植被对气温变化最大响应无滞后,对降水变化的最大响应滞后 1 个月^[26]。以上研究与本文的研究结果一致。此外,有研究表明长江中下游地区土壤含水量较高,大气的降水变化并不一定能促进植被的增长,温度和日照时数的增加促进植被净初级生产力(NPP)的增加^[27]。

在 NDVI 与气象因子相关性的空间分布上,淮北平原宿州市以西部分地区 NDVI 与降水和气温的相关性都比较低。降水方面,一是该区近 50 年降水变化不大;二是淮北平原地势平坦,蓄水载体少,主要发展河灌、井灌等灌溉农业^[28]。气温方面,研究表明 CO_2 浓度和气温升高会导致产量提高,品质下降。但研究仍有不确定性,气温对农作物产量的影响目前尚缺乏实验验证^[29,30]。

NDVI 的驱动分区表明,气温驱动型是最主要类型。这与以往的研究有所差异。王芳等^[16]研究安徽省植被净初级生产力(NPP)驱动因素表明,非气候驱动型占 89.3%,王强等^[16]研究横断山区植被净初级生产力驱动因素,结果表明非气候驱动型占 91.6%,考虑到以上研究主要针对年均 NPP 变化的驱动因素,而本文针对月均 NDVI 的驱动因素,两者考虑的时间尺度有所差异。

4.2 结论

对安徽省 2000~2016 年 NDVI 动态变化及其与降水和气温关系分析得出以下结论:

(1)研究时段内,安徽省 NDVI 整体呈显著上升趋势,增速为 $5.7\sim 11.3\times 10^{-3}/a$ 。不同植被类型中,旱地增长较快,阔叶林和灌丛增长较缓。除水田外,10 月至翌年 3 月具有显著增加趋势,6~9 月增加趋势不明显。空间上,皖南山区、江淮之间大别山区和淮北平原增长较快,沿江平原、环巢湖地区增加较缓或变化不大。

(2)NDVI 与当月降水量相关性在 0.31~0.56 之间,其中水田的相关性最高,NDVI 与当月气温相关性在 0.47~0.85 之间,其中草地和水田最高。月均 NDVI 与降水、气温的相关性具有一个月的时滞性,均为与前一个月的相关性最高。

(3)像元尺度 NDVI 与降水的偏相关性较差,其中正相关达到 0.01 显著性水平的面积仅占 8.2%,而与气温的偏相关性较好,其中正相关达到 0.01 显著性水平的面积占 92.2%。

(4)月尺度 NDVI 的驱动分区中,NDVI 变化主要受气温影响的地区占 76.4%,体现了气温因子的控制作用;受降水气温共同影响的地区占 15.3%,受到非降水、气温影响的地区占 5.8%。

植被覆盖受到气温、降水的制约,但影响植被覆盖及其分布的因素还有土壤条件、太阳辐射、人类的农林活动等。本研究仅做了植被、降水、气温之间的关系分析,由于数据和研究内容的局限性,所得结论仅限于文中数据。在今后的研究中,有待开展植被物候期的 NDVI 动态变化规律、植被覆盖影响因素中人类活动因素的分离、基于高时空精度遥感和气象数据源的研究等,以便更精确刻画区域植被覆盖动态及其影响因素。

参考文献:

- [1] 栾金凯,刘登峰,黄强,等.近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素[J].生态学报,2018,38(8):2780-2790.
- [2] 郑海亮,房世峰,刘成程,等.青藏高原月 NDVI 时空动态变化及其对气候变化的响应[J].地球信息科学学报,2019,21(2):201-214.
- [3] HAO F H, ZHANG X, OUYANG W, et al, Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2012, 17(4):389-398.
- [4] SUN J, QIN X J. Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4):291.
- [5] KAWABATA A, ICHII K, YAMAGUCHI Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(7):1377-1382.
- [6] WANG Z, HUANG M, WANG R, et al. Global NDVI patterns in response to atmospheric water vapor anomalies over the indo-pacific warm pool during April-June [J]. Journal of Climate, 2019, 32(4):1167-1180.
- [7] HAN J C, HUANG Y, ZHANG H, et al. Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232:1037-1048.

-
- [8]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.
- [9]郭磊,王世东.河南省近 30 年植被指数与气象因子的相关性分析[J].生态科学,2018,37(5):102-112.
- [10]CHU H, VENEVSKY S, WU C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:2051-2062.
- [11]PANG, G, WANG X, YANG M. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012 [J]. Quaternary International, 2017, 444:87-96.
- [12]张智韬,兰玉彬,郑永军,等.影响大豆 NDVI 的气象因素多元回归分析[J].农业工程学报,2015,31(5):188-193.
- [13]程红霞,林粤江.北疆棉花 NDVI 与气象因子的相关性分析[J].中国农学通报,2014,30(12):129-133.
- [14]任秀真,徐光来,刘永婷,等.安徽省近 56 年气候要素时空演变特征.水土保持研究,2018,25(5):287-294.
- [15]王芳,汪左,张运.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[J].生态学报,2018,38(8):2754-2767.
- [16]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.
- [17]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.
- [18]王刚,张行南,刘扬扬,等.嘉陵江流域 NDVI 年季变化特征及其与气象因子的关系.河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):21-25.
- [19]李艳芳,孙建.青藏高原 NDVI 时空变化特征研究(1982-2008) [J]. 云南农业大学学报(自然科学),2015,30(5):790-798.
- [20]孟梦,牛铮,马超,等.青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):360-365,372.
- [21]靳春燕,贾德彬,戴鑫,等.锡盟草地 NDVI 时空变化与气象因子关系. [J]. 人民黄河,2013,35(1):88-90,93.
- [22]神祥金,吴正方,杜海波.东北地区植被 NDVI 变化及对气象因子的响应. [J]. 东北师大学报(自然科学版),2013,45(1):123-130.
- [23]刘永婷,徐光来,尹周祥,等.全球变化背景下安徽近 55 a 气温时空变化特征[J].自然资源学报,2017,32(4):680-691.
- [24]曾婷,杨东,郭佩佩,等.1960-2012 年安徽省降水和气温变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J].热带地理,2014,34(6):783-793.
- [25]杨艳蓉,张增信,张金池,等.长江中下游地区植被覆盖与区域气候变化的关系研究[J].南京林业大学学报(自然科学

版), 2013, 37(6):89-95.

[26]白淑英, 王莉, 史建桥. 长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4):579-586.

[27]王琳, 景元书, 李琨. 江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2529-2533.

[28]张虎. 淮北平原井灌区水资源优化配置研究——以萧县为例[D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 2014.

[29]姚筠, 许莹, 马晓群. 淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制[J]. 资源科学, 2017, 39(3):490-500.

[30]房世波, 沈斌, 谭凯炎, 等. 大气 CO₂ 和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5):1116-1124.