

基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究

桑国庆^{1, 2} 唐志光¹ 邓刚^{1, 2} 管庆丹³ 陈浩¹ 李朝奎¹ 王晓茹^{1, 21}

(1. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 昆明理工大学 国土资源与工程学院, 云南 昆明 650093)

【摘要】: 基于 MODIS NDVI 时间序列数据集, 运用 Mann-Kendall 趋势分析检验、Hurst 指数和相关分析等方法, 对 2000~2018 年湖南省植被时空变化特征、演化趋势的可持续性及其与气温、降水和日照时数的关系进行了研究。结果表明: (1) 湖南省植被覆盖整体较高(年均 NDVI 为 0.54), 高植被覆盖区主要分布在以林地覆盖为主的山地和丘陵地区; NDVI 具有明显的季节变化特征, 8 月份最高(0.67), 2 月份最低(0.36)。(2) 近 19 年湖南省 NDVI 整体呈上升态势, 增速为 8.6%/10a ($P < 0.01$); 其中显著增加的地区占 76.09%, 主要分布在湘中与湘西北的林地、耕地、草地区域; NDVI 显著下降的区域仅占 1.46%, 主要分布在长株潭等建设用地区域以及洞庭湖平原的局部耕地区域。(3) 未来湖南省植被变化的总体趋势可能向退化的恶性方向发展(占 76.59%), 其中改善与强反持续性趋势占 23.25%。(4) 日照时数、气温对研究区植被 NDVI 的影响主要表现为冬季的正相关。

【关键词】: NDVI 时空变化 气候因子

【中图分类号】: TP79 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)05-1100-10

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 是联结土壤、水分和环境等要素的自然纽带^[1], 在调节气候、保持水土、改良土壤和维持生物多样性方面发挥着重要作用^[2,3]。植被既是气候变化的承受者, 同时又对气候变化产生反馈作用, 是全球气候变化的“指示器”^[4,5]。此外, 植被覆盖的退化和恢复与人类活动密切相关, 在一定程度上能够反映区域生态系统的演化状况。近年来, 在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 以植被为主体的陆地生态系统、植被与气候间的平衡关系受到了不同程度的扰动和破坏, 植被及其动态变化备受关注, 地表植被变化研究已成为国内外全球变化科学研究的重要内容^[6~9]。

卫星遥感技术能够获取实时、动态、连续的地表植被覆盖信息, 是当前植被动态变化监测和全球变化研究的一个重要途径^[10,11]。植被指数是卫星遥感中最具备明确意义的指数之一, 是基于植被叶绿素在可见光红光波段的强吸收及在近红外波段的强反射特性, 通过可见光波段与近红外波段的组合实现对植被信息状态的表达^[12]。目前, 较常见的植被指数主要有比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)、差值植被指数(difference vegetation index, DVI)、调整土壤亮度的植被指数(soil-adjusted vegetation index, SAVI)、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等^[13]。其中, 归一化植被指数(NDVI)不仅可以精确地反映植被的生长状态等信息, 而且能够部分消除

作者简介: 桑国庆(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态遥感。E-mail:sgqmail.hnust.edu.cn

唐志光, E-mail:tangzhgl@hnust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871058); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3154); 湖南科技大学校级科研项目(CXTD003)

太阳高度角、卫星观测角、地形、云影等与大气条件有关的辐射变化的影响,是目前国际上在多领域研究中最常用的植被遥感监测指数^[14]。随着卫星遥感技术的发展,NDVI 遥感数据集不断丰富,Landsat TM、NOAA-AVHRR、SPOT-VGT、MODIS 成为植被变化研究的主要数据源^[15~21],特别是 MODIS 数据时序从 2000 年至今,因具有相对较高的光谱和时空分辨率,决定了其在大范围植被变化研究中的优势,被广泛应用于区域与全球尺度植被变化和生态环境监测^[22~24]。近 20 年来,国内外学者基于长时间序列 NDVI 数据,从不同时空尺度对植被变化开展了深入研究。大量研究表明,全球范围内植被活动增强^[25,26],北半球尤其是中高纬度植被活动显著增强^[27]。中国及其区域性植被研究也得出相似的结论^[24,28~33]。

湖南省属亚热带季风湿润气候区,水热条件良好,植被资源丰富。然而,湖南省又处于中国地形第二阶梯和第三阶梯的过度地带,山地丘陵交错、地形起伏大、雨量多而集中,在南方丘陵山区中水土流失问题严重^[34,35]。近年来在人类活动的影响下,城乡建设用地增加,耕地、草地面积大幅度减少,湖南省生态系统完整性受到一定程度的破坏^[36]。在全球气候变化的背景下,研究湖南省植被变化的时空差异性,为应对该地区的水土流失问题以及生态系统的可持续发展具有重要意义。本文基于 MODISNDVI 时间序列数据,采用趋势分析、Hurst 指数等方法分析了湖南省近 19 年植被 NDVI 的时空变化特征及其未来发展趋势,并探讨了植被变化与气温、降水和日照时数变化之间的关系。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

湖南省地处长江中游南部,界于 108° 47' ~114° 15' E,24° 38' ~30° 08' N 之间,毗邻广东、广西、重庆、贵州、湖北和江西,面积约 21.18 万 km²。地貌以山地、丘陵为主,东、西、南三面环山,中部为马蹄形盆地,北部为低平的洞庭湖平原。区内年均气温在 15℃~18℃之间,年均降雨量在 1200~1700mm 之间,气候属亚热带季风湿润气候,主要植被类型为亚热带常绿阔叶林。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 MODIS 数据

本研究采用来源于美国国家航空航天局(NASA)的 2000~2018 年 MODIS NDVI(MOD13A1)产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/>),数据时间分辨率为 16d,空间分辨率为 500m。首先使用 MODIS Reprojection Tool(MRT)对该数据产品进行格式和投影转换,然后采用最大值合成法(MFC)^[37]对 NDVI 数据进行逐月最大化合成处理,生成研究区 2000~2018 年逐月 NDVI 时间序列数据集。

1.2.2 气象数据和土地覆盖数据

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选用 2000~2018 年湖南省 29 个气象站点的逐日降水量、日照时数和平均气温数据,分别计算各气候因子与 NDVI 对应时间段(月、春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)、冬(12~翌年 2 月)、年)的统计值。为分析不同类型植被时空动态变化及其与气温、降水和日照时数的关系,根据 2010 年湖南省土地利用遥感监测数据提取耕地、林地和草地 3 种土地覆盖分类数据,该数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1km。

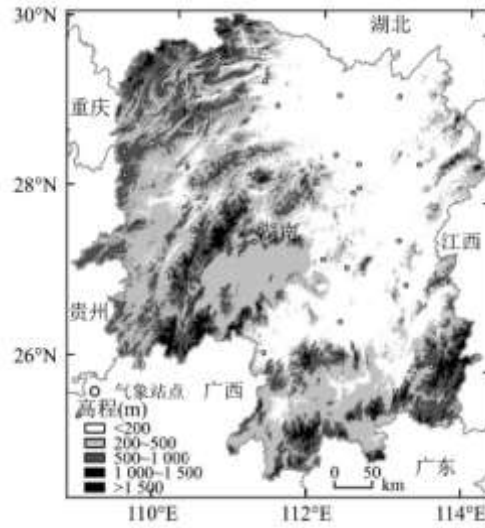


图 1 研究区概况及气象站点分布

2 研究方法

2.1 Mann-Kendall 趋势检验

采用 Sen 趋势分析方法计算湖南省时间序列 NDVI 的变化趋势, 结合 Mann-Kendall 检验方法对湖南省 NDVI 的变化趋势进行显著性检验^[38~40]。Sen 趋势分析方法是一种广泛应用于气象学和水文学中的非参数统计检验方法, 其优点在于不需要样本服从一定的分布, 且不受异常值的干扰, 适用于检验时间序列的变化趋势^[41~44]。计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_i - x_k}{j - k}\right), 1 < k < j < n \quad (1)$$

式中: β 为衡量 NDVI 变化趋势的指标斜率; i, j 为时间序数; x_i, x_j 分别为时间序列第 i 年和第 j 年的 NDVI 值。当 $\beta > 0$, 表明时间序列的 NDVI 呈上升趋势; 当 $\beta < 0$, 表明时间序列的 NDVI 呈下降趋势; 当 $\beta = 0$, 表明时间序列的 NDVI 基本不变。将 β 划分为 3 个等级: 减少 ($\beta < -0.001$)、基本不变 ($-0.001 < \beta < 0.001$)、增加 ($\beta > 0.001$)。

利用 Mann-Kendall 方法对 Sen 趋势分析结果进行显著性检验^[38, 45]。给定显著性水平 α , 若正态分布统计量 $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$, 则表明序列在该显著性水平下, 通过显著性检验。当 $|Z_c| \geq 1.28, 1.64$ 时, 分别通过置信度为 90%、95% 显著性检验, 将显著性划分为显著减少 ($Z_c < -1.64$)、减少不显著 ($-1.64 < Z_c < -1.28$)、基本不变 ($-1.28 < Z_c < 1.28$)、增加不显著 ($1.28 < Z_c < 1.64$) 和显著增加 ($Z_c > 1.64$) 5 类。

2.2 Hurst 指数

Hurst 指数是著名水文学家 Hurst 在研究尼罗河流量的长期变化时首先提出来的, 是定量描述时间序列信息长期依赖性的主要方法之一, 广泛应用于气象、水文等领域^[45~48]。采用基于重标极差 (R/S) 分析方法的 Hurst 指数来定量描述 NDVI 时间序列变化的持续性或反持续性, 以此揭示湖南省植被演变趋势的可持续性特征^[6, 45, 49~51]。其具体算法如下:

存在时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义其均值序列为:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (2)$$

累计离差序列:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau), \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差序列:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

标准差序列:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

如果关系 $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$ 成立, 则说明时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots$ 存在 Hurst 现象, 式中: H 值为 Hurst 指数, 一般介于 0~1 之间。当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明 NDVI 未来变化趋势与过去变化趋势相反, 即具有反持续性特征, 且 H 值越接近于 0, 反向可持续性越强; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明 NDVI 未来变化趋势与过去变化趋势相同, 即存在同向持续性特征, 且 H 值越接近 1, 同向可持续性越强; 当 $H=0.5$ 时, 表明 NDVI 时间序列为随机序列, 处于独立状态, 即未来变化趋势与过去变化趋势不存在相关性。

2.3 相关性分析

利用相关系数定量描述植被 NDVI 与气温、降水和日照时数之间的相关关系^[52], 计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: y_i 表示第 i 年季节平均气温、降水量和日照时数; $\bar{y}$ 表示气温、降水和日照时数多年季节平均值; x_i 表示在第 i 年 NDVI 季节平均值; $\bar{x}$ 表示 NDVI 的多年季节平均值。

以上 3 种数据分析方法在 Matlab 软件中实现。

3 结果与分析

3.1 湖南省 NDVI 空间分布特征

湖南省植被覆盖良好,多年平均 NDVI 为 0.54(图 2)。NDVI 均值大于 0.55 的高植被覆盖区面积为 104154.5km²,占湖南省总面积的 48.8%,主要分布在以林地覆盖为主的山地和丘陵地区;NDVI 均值介于 0.40~0.55 之间的植被覆盖区面积为 99435.3km²,占 46.6%,分布在以耕地和林地覆盖为主的平原、丘陵地区;NDVI 均值小于 0.40 的低植被覆盖区域面积为 9824.5km²,占 4.6%,主要分布在受人类活动影响较大的城镇建设用地区域和部分耕地区域。

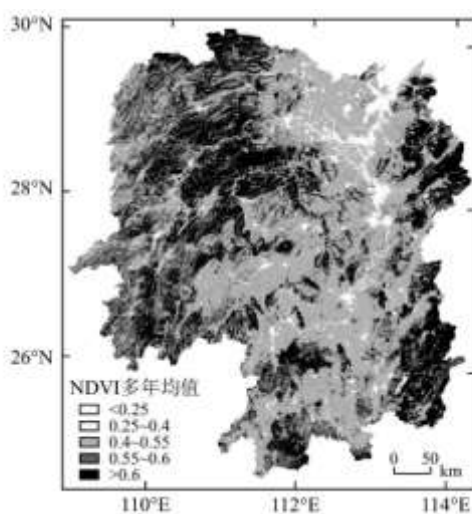


图 2 2000~2018 年湖南省 NDVI 平均值空间分布图

3.2 湖南省 NDVI 时空变化特征

从 NDVI 年内变化来看,湖南省 NDVI 月均值具有明显的季节变化特征,其值介于 0.36~0.67 之间,波峰和波谷分别出现在 8 和 2 月(图 3)。3~8 月 NDVI 值不断上升,4 月增长幅度最大(25.53%);9~12 至翌年 2 月 NDVI 值不断下降,12 月下降幅度最大(-13.68%)。

2000~2018 年湖南省 NDVI 总体呈上升趋势,增速为 8.6%/10a($P<0.01$)(图 4(a))。其中 NDVI 年均值在 2018 年达到最大值(0.60),2005 年达到最小值(0.49)。近 19 年,有 11 年 NDVI 增长率为正值,7 年为负值,其中 2013 年增长幅度最大(16.47%),2012 年下降幅度最大(-9.68%)。为进一步了解湖南省不同植被覆盖类型 NDVI 变化,利用 2010 年土地覆盖数据分别统计历年耕地、林地、草地和全省 NDVI 均值(图 4),3 种植被覆盖类型的 NDVI 与全省 NDVI 变化具有明显的一致性,均呈显著增加趋势($P<0.01$),增加速率为草地>林地>耕地。

对研究区 2000~2018 年的 NDVI 数据进行逐像元趋势分析,得出近 19 年湖南省 NDVI 变化趋势及显著性水平的分布图(图 5)。统计 NDVI 变化趋势及显著性分析结果表明:近 19 年湖南省植被 NDVI 总体呈上升趋势,其中呈显著增加($P<0.05$)趋势的地区占湖南省总面积的 76.09%,主要分布在湘中和湘西北的林地、耕地、草地区域;显著减少($P<0.05$)趋势的区域占 1.46%,主要分布在长株潭等城市建设用地区域以及洞庭湖平原的局部耕地区域。

研究区植被 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.05~0.94 之间, 平均值值为 0.41, 小于 0.5 的面积占 81.66%, 说明湖南省植被变化整体呈反持续性特征(图 6)。由于 Hurst 指数越接近 0.5, 未来变化的可持续性和反持续性与过去变化趋势相关性越弱, 故将 Hurst 指数范围设定为强反持续性、弱反持续性、弱持续性、强持续性 4 种类型, 阈值分别为: <0.35, 0.35~0.5, 0.5~0.65, >0.65。将 NDVI 空间变化趋势 β (改善、基本不变和退化) 与 4 种类型可持续性指数 H 进行叠加, 结果分为基本不变、4 类良性发展方向 (改善与强持续性、改善与弱持续性、退化与强反持续性、退化与弱反持续性) 和 4 类恶性发展方向 (退化与强持续性、退化与弱持续性、改善与强反持续性、改善与弱反持续性), 以此揭示湖南省 NDVI 变化的历史特征和未来态势。由图 6 可知, 未来湖南省 NDVI 变化整体发展态势可能向退化的恶性方向发展 (占 76.59%), 其中改善与强反持续性趋势占 23.25%。持续退化的区域 (1.27%) 主要位于长株潭地区和其它建设用地区域, 可能与长株潭区域经济一体化进程的推进有关, 这与唐志光等^[63]得出长株潭地区不透水面扩张显著的结论基本相符。过去退化未来是改善趋势的区域 (1.81%) 主要分布在局部建设用地区域, 可能是由于城市扩张过程中对原有植被造成破坏, 而人工绿化不断加强, 城市绿度将改善。持续改善的区域 (15.47%) 主要分布在湖南省中西部的雪峰山和南岭, 植被覆盖类型以林地为主, 这很可能与森林保护措施的实施有关。基本不变的区域 (6.12%) 植被类型以耕地为主。洞庭湖平原由于受人类活动和农田种植结构变化的影响较大, 未来演变特征复杂。

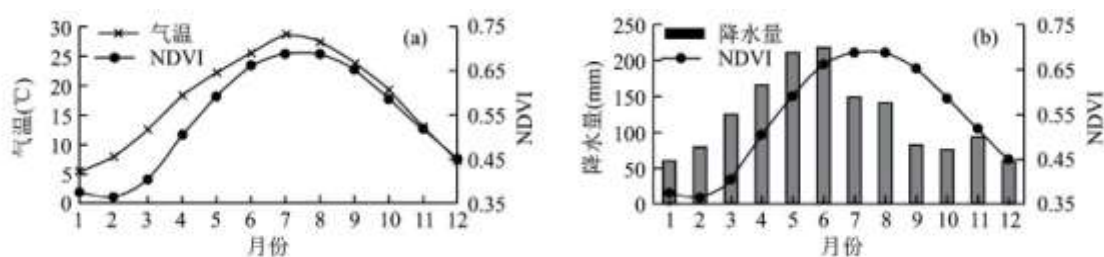


图 3 2000~2018 年湖南省月 NDVI、气温(a)和降水(b)变化

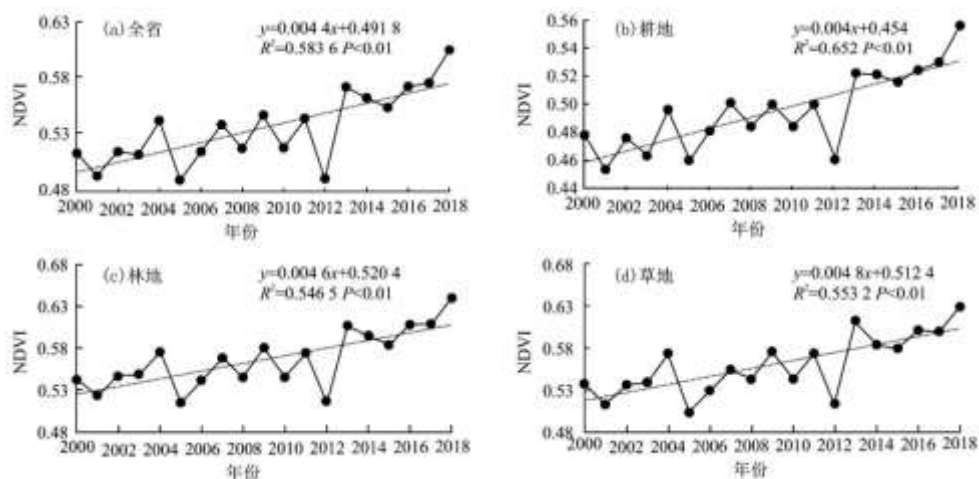


图 4 不同类型植被 NDVI 及全省 NDVI 年际变化

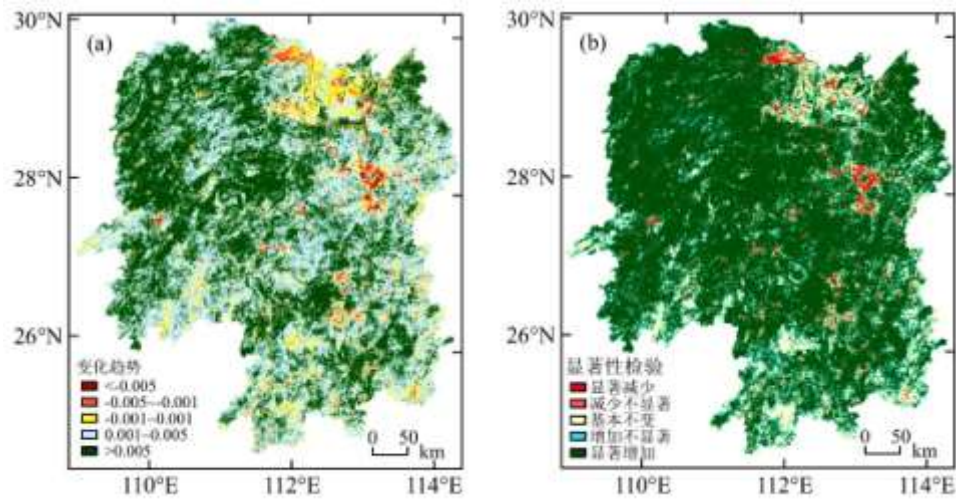


图 5 2000~2018 年湖南省 NDVI 变化趋势及显著性

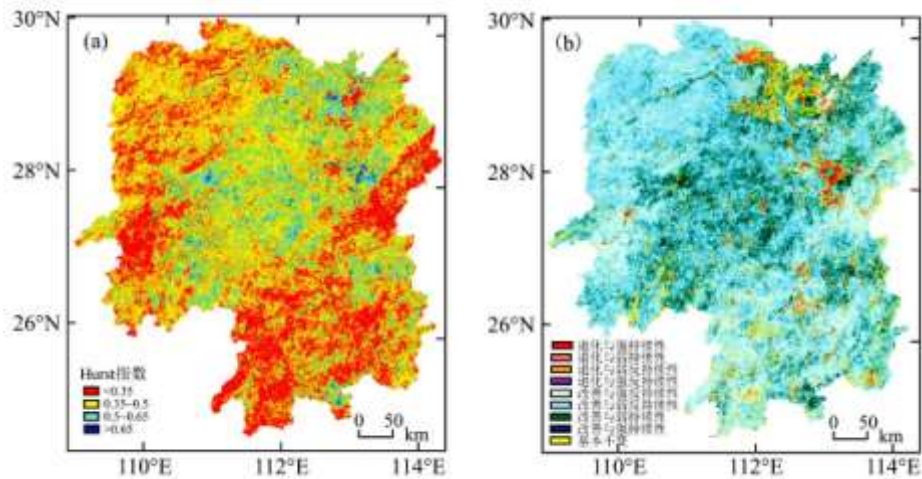


图 6 湖南省植被 NDVI 的 Hurst 指数及未来趋势

3.3 湖南省 NDVI 与气温、降水和日照时数的关系

为探讨研究区植被 NDVI 变化与气温、降水和日照时数之间的关系，本研究基于湖南省 29 个气象观测台站数据和 2010 年土地利用遥感监测数据，分别计算了不同类型植被 NDVI 与气温、降水和日照时数的相关系数并进行显著性检验。结果显示：冬季 NDVI 与日照时数的相关性最高，其次是与气温的相关性，与降水量的相关性不明显，不同植被类型表现出相似的特征。冬季 NDVI 与日照时数呈显著正相关 ($P < 0.05$)，原因可能是当冬季日照时数明显增多时，达到植被生长发育所需的条件。春季植被覆盖类型为林地的 NDVI 和冬季耕地、林地的 NDVI 均与气温呈显著正相关。原因可能是：湖南省气候类型为亚热带季风性湿润气候，降水丰沛，年均降雨量介于 1200~1700mm，春季、冬季月均温高于 5℃ (图 3)，植被仍处于生长季，尤其林地处于高海拔地区降水较多，气温相对较低；气温变化直接影响植物的光合、呼吸和蒸腾代谢过程，从而改变植被的生长状况^[54]，因而春、冬季植被尤其是海拔较高的林地 NDVI 受气温的影响较大；而冬季以水田为主的耕地休耕，自然植被受人类活动影响小，生长旺盛，NDVI 与气温的相关性较强。然而，研究区夏秋季气温较高，蒸发旺盛，植被呼吸作用增强、光合作用减弱，在一定程度上抑制植被生长，加之夏秋季水热条件组合复杂，导致不同类型植被 NDVI 与气温的相关性不明显，甚至表现为负相关。此外，可以看出，春

夏季 NDVI 与降水呈弱负相关($P>0.05$), 而秋季 NDVI 与降水呈弱正相关($P>0.05$), 原因可能是春夏季降水较多一定程度上抑制植被生长, 而秋季气温较高降水相对较少, 土壤水分蒸发旺盛, 导致植被受秋旱的影响, 不同类型植被在秋季与降水的关系较为密切。

为避免气候因子间的相关性对分析 NDVI 影响因子的干扰, 对冬季 NDVI 与气温、降水和日照时数进行回归分析。在统计意义上, 气温、降水量和日照时数解释湖南省冬季植被 NDVI 变化的 54%, 日照时数对该区 NDVI 变化的影响最大, 其次为气温和降水。这与郭晶等^[55]对洞庭湖流域植被指数变化影响因素研究结果基本一致。

4 结论

本文利用 MODISNDVI 时间序列数据, 分析近 19 年湖南省 NDVI 的时空变化特征、演化趋势的可持续性及其与气温、降水和日照时数的关系, 主要结论如下:

(1) 近 19 年湖南省植被整体覆盖较高(年均 NDVI 为 0.54), 高植被覆盖区占湖南省总面积的 48.8%, 主要分布在以林地覆盖为主的山地、丘陵地区;低值植被覆盖区域占 4.6%, 主要分布在建设用地和部分耕地区域;年内 NDVI 具有明显的季节变化特征, 2 月最低(0.36), 8 月最高(0.67)。

(2) 2000~2018 年湖南省 NDVI 整体呈显著上升态势, 增速为 8.6%/10a($P<0.01$), 不同类型植被 NDVI 均呈显著增加趋势($P<0.01$)。其中 NDVI 呈显著增加的地区占湖南省面积的 76.09%, 主要分布在湘中和湘西北的林地、耕地、草地区域;显著减少的区域占 1.46%, 主要分布在长株潭等建设用地区域以及洞庭湖平原的局部耕地区域。

(3) 未来湖南省 NDVI 整体变化趋势以反持续性特征为主(81.66%), 发展态势可能将向退化的恶性方向发展(占 76.59%), 其中改善与强反持续性趋势占 23.25%。

(4) 冬季 NDVI 与日照时数的相关性最高, 其次是与气温的相关性, 与降水量的相关性不明显, 不同植被类型表现出相似的特征。春季林地和冬季耕地、林地的 NDVI 均与气温呈显著正相关($P<0.05$);而降水对植被 NDVI 的影响主要表现为春夏季的弱负相关($P>0.05$)和秋季的弱正相关($P>0.05$)。

然而, 植被变化的影响因素是多方面的, 包括气候变化(气温、降水、太阳辐射等)、土地利用变化、大气成分变化(CO_2 浓度、氮沉降等)和人类活动等因素的综合影响。而本文仅分析了植被变化与气温、降水和日照时数之间的关系;因此, 如何定量研究植被变化及其未来发展趋势的影响因素是一项具有挑战性的研究内容。

参考文献:

- [1]唐见, 曹慧群, 陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化[J]. 地理学报, 2019, 74(1):76-86.
- [2]方精云, 耿晓庆, 赵霞, 等. 我国草地面积有多大[J]. 科学通报, 2018, 63(17):1731-1739.
- [3]冉有华, 马瀚青. 中国 2000 年 1 km 植物功能型分布图[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4):827-832.
- [4]FANG J Y, SONG Y C, LIU H Y, et al. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(9):1105-1122.

-
- [5]吴正方. 东北地区植被-气候关系研究-及全球气候变化影响评价[M]. 长春:东北师范大学出版社, 2003, 1-15.
- [6]刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5):705-716.
- [7]陈京华,贾文雄,赵珍,等. 1982-2006 年祁连山植被覆盖的时空变化特征研究[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7):834-845.
- [8]唐志光,马金辉,李朝奎,等. 石羊河流域上游植被时空变化及其对区域气候的响应[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3):116-120, 127.
- [9]谭美宝,冉有华,苏阳,等. 黑河流域 2001-2017 年植被变化特征及其可延续性评价[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2):335-344.
- [10]REES M, CONDIT R, CRAWLEY M, et al. Long-term studies of vegetation dynamics[J]. Science, 2001, 293(5530):650-655.
- [11]邵怀勇,武锦辉,刘萌,等. MODIS 多光谱研究攀西地区植被对气候变化响应[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1):167-171.
- [12]朴世龙,方精云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1):119-125.
- [13]苏俊磊,罗为群,王广哲,等. 基于 MODIS-EVI 的广东西江流域植被时空变化特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(03):232-238.
- [14]PIAO S L, WANG X H, CIAIS P, et al. Changes in satellitederived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology, 2011, 17(10):3228-3239.
- [15]韩辉邦,马明国,马守存,等. 近 30a 青海省植被变化及其气候驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5):1164-1174.
- [16]WANG J, PRICE K P, RICH P M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18):3827-3844.
- [17]VAN DE VOORDE T, VLAEMINCK J, CANTERS F. Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from Landsat ETM+data: A case study on Brussels[J]. Sensors, 2008, 8(6):3880-3902.
- [18]JACQUIN A, SHEEREN D, LACOMBE J P. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12: S3-S10.
- [19]李辉霞,刘国华,傅伯杰. 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[J]. 生态学报, 2011, 31(19):5495-5504.
- [20]ECKERT S, H SLER F, LINIGER H, et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 113:16-28.

-
- [21]黄悦悦, 杨东, 冯磊. 2000-2016 年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2019, 38 (8):2515-2523.
- [22]ANYAMBA A, TUCKER C J. Analysis of sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63 (3):596-614.
- [23]TUCKER C J, NEWCOMB W W, LOS S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(6):1133-1135.
- [24]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.
- [25]EASTMAN J R, SANGERMANO F, MACHADO E A, et al. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982-2011[J]. Remote Sensing, 2013, 5(10):4799-4818.
- [26]PIAO S L, WANG X H, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth&Environment, 2020, 1(1):14-27.
- [27]杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, 等. 气候变暖背景下近 30a 北半球植被变化研究综述[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2):379-391.
- [28]PENG S S, CHEN A P, XU L, et al. Recent change of vegetation growth trend in China[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4):044027.
- [29]刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982-2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16):5331-5342.
- [30]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.
- [31]JIANG D J, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Interannual variability and correlation of vegetation cover and precipitation in Eastern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 118(1-2):93-105.
- [32]董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 等. 2000-2017 年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响[J]. 地理科学进展, 2020, 39(1):24-35.
- [33]孙锐, 陈少辉, 苏红波. 黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应[J]. 地理研究, 2020, 39(5):1200-1214.
- [34]梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1):22-27.
- [35]陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6):1288-1297.
- [36]刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例[J]. 地理研究, 2015, 34(4):691-700.
- [37]HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. International

Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11):1417-1434.

[38] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975: 109-117.

[39] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[40] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendal' s tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

[41] FATHIAN F, DEGHAN Z, BAZRKAR M H, et al. Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(5): 892-904.

[42] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen' s slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172-182.

[43] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174.

[44] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报. 2017, 32(3): 449-460.

[45] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 365-367.

[46] 刘永婷, 徐光来, 李鹏, 等. 淮河上游径流年内分配均匀度及变化规律[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 99-104.

[47] ZAMANI R, MIRABBASI R, ABDOLLAHI S, et al. Streamflow trend analysis by considering autocorrelation structure, long-term persistence, and Hurst coefficient in a semi-arid region of Iran[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(1-2): 33-45.

[48] 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, 24(2): 177-182.

[49] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.

[50] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 960-970.

[51] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山地植被 NDVI 及其气候响应的多维变化[J]. 地理研究, 2017, 36(4): 765-778.

[52] 姜琳, 冯文兰, 郭兵. 雅鲁藏布江流域近 13 年植被覆盖动态监测及与降水因子的相关性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1610-1619.

[53] 唐志光, 邓刚, 李少为, 等. 基于 Google Earth Engine 的湖南省近 30 年不透水面时空变化研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(2): 41-46.

[54] 邓伟, 袁兴中, 刘红, 等. 区域性气候变化对长江中下游流域植被覆盖的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 1032-1042.

[55] 郭晶, 关华德, 章新平. 1982-2010 年洞庭湖流域植被指数的变化及其与气候因子的相关分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1305-1314.