

洞庭湖流域植被覆盖变化及其协同治理

孙颖¹ 易浪^{1, 2} 尹少华³¹

(1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 中国湖南 长沙 410004;

2. 湖南财政经济学院 湖南省经济地理研究所, 中国湖南 长沙 410205;

3. 中南林业科技大学 商学院, 中国湖南 长沙 410004)

【摘要】: 植被覆盖变化是评估生态效应与治理成效的关键性因素之一。基于洞庭湖流域 2000—2019 年 MODISNDVI 和同期气温、降水、土地利用等相关数据, 运用 Sen+Mann-Kendall、Hurst 指数、偏相关分析、残差分析等多种方法, 全面分析了流域植被覆盖时空演化与未来变化趋势, 主要结论如下: (1) 年际变化上, 流域生长季 NDVI 呈分阶段波动上升趋势, 植被覆盖显著增加。(2) 空间分布上, 流域大部分区域植被覆盖状况良好, 呈“西高东低”分布特征; 但未来流域大部区域植被 NDVI 可能呈增长放缓或退化趋势。(3) 气候影响因素上, 流域生长季 NDVI 与降水和气温变化均呈正相关, 但气温对植被生长的正向促进作用强于降水。(4) 人类影响因素上, 农业生产与生态工程建设对流域植被变化具有正面效应; 土地利用变化对流域植被变化具有双重影响作用; 城市扩张则是导致 NDVI 减少的主要因素之一。未来流域生态治理范围应重点关注残差呈持续减少特征的湖区沿线、经济较发达区域以及已建成经济区的周边扩展区域, 构建“有为政府、有效市场、有机社会”三位一体的生态协同治理新格局。

【关键词】: 洞庭湖流域 植被覆盖变化 驱动因素 协同治理 生态工程

【中图分类号】: X826; F301.24 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2022) 04-0190-12

植被覆盖变化是土壤、大气、水分、气温以及人类活动等综合作用的结果^[1], 一定程度上反映了区域生态环境的整体状况, 在全球变化研究中发挥着“指示器”作用^[2]。一方面, 植被覆盖变化直接影响地表反照率、温室气体、生态功能等地气系统特征的改变^[3]; 另一方面, 气候与人类活动又直接影响着地表植被的构成与生长量。动态且长时间序列地监测植被生长变化情况, 能有效反映出研究区气候因素与人类活动对陆地生态系统演变的影响, 有助于人类更好地模拟生态环境变化趋势, 是评估生态系统的功能性与服务性的有效指标^[4]。从某种程度上而言, 植被覆盖变化反映了生态环境演变的过程, 对其进行深入的驱动因素分析有利于区域生态环境综合治理的科学规划与决策。

归一化植被指数 (Normal Difference Vegetation Index, NDVI) 是监测植被与研究生态系统变化最常用的参数之一, 能客观呈现较大范围内植被覆盖的具体信息^[5], 在植被覆盖的年际变化、时空分异特征以及其驱动因素等相关研究之中得到广泛应用^[6]。现有大量研究表明, 气候变化与人类活动是植被覆盖变化的关键影响因素, 但不同时空尺度下其研究结论具有一定的差异性。Fensholt 等指出气温与降水是影响 1981—2007 年全球半干旱地区植被生长的主要限制因素^[7]。Mohammat 等指出干旱与春冷是导

作者简介: 孙颖 (1985—), 女, 湖南长沙人, 博士/博士后, 研究方向为区域生态一体化、生态经济管理。E-mail:sunying@csuft.edu.cn; 易浪 (1989—), 男, 湖南株洲人, 博士研究生, 研究方向为土地利用与景观生态、生态经济管理。E-mail:yilang0107@126.com

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19BJY045); 湖南省教育厅科学研究项目 (21B0258)

致 1982—2009 年亚洲内陆地表植被生长速度减缓、绿化程度降低的主要原因^[8]。信忠保等发现气候变暖延长了黄土高原植被的生长期,农业生产、退耕护林等人类活动对植被变化具有正面效应^[9]。穆少杰等发现影响内蒙古植被生长的关键因素为水热组合的共同作用^[10]。易浪等发现影响黄土高原植被覆盖变化的主要驱动因素为降水与人类活动的正负效应^[11]。邓晨晖等发现秦岭地区植被覆盖变化的主要贡献因子为“人类活动>降水>气温>潜在蒸散量”^[12]。对比已有研究可知,我国现有植被覆盖研究成果多集中于黄土高原、青藏高原、内蒙古等西北生态脆弱区与华东、华北等人口密集区^[13]。近年来,大尺度下长江、黄河、海河、淮河等流域植被覆盖研究逐渐受到关注^[14,15],但鲜有研究针对洞庭湖流域进行长时间序列的植被时空监测与归因分析。

“共抓大保护、不搞大开发”不仅是推动长江经济带发展的战略导向,更是指导洞庭湖流域沿线生态经济协同发展的主导思想。洞庭湖流域具有相对独立的复杂生态系统,植被资源丰富,地形地貌多样,是长江经济带重要的组成部分。近年来,湖区面积萎缩、生态功能退化、生物多样性破坏等生态环境问题频发,经济发展与生态环境保护严重失衡^[14]。植被覆盖变化作为研究区域生态环境演变的重要指标,是人类应对未来气候改变与确定未来人为干预活动区域的主要依据。目前,洞庭湖流域植被覆盖研究主要聚焦于气候因素的相关分析^[15],涉及人类活动影响的研究尚少。然而,随着流域沿线工业化、城市化、经济化程度不断升高,流域内生态环境污染扩散现象严重,湖区政府生态治理主体相对单一且跨区治理合作机制不畅导致综合治理难度较大,生态治理体系呈相对“结构化割裂”特征^[16]。本研究基于 2000—2019 年洞庭湖流域 MO-DIS-NDVI 和同期气温、降水、土地利用等相关数据,结合 Sen+Mann-Kendall、Hurst 指数、偏相关分析、残差分析等多种方法,系统研究流域植被覆盖的年际变化、空间分布与变化趋势,进一步探讨植被覆盖变化驱动因素与响应程度,深化“植被、气候与人类活动”三者间的关系认知,可为洞庭湖流域环境协同治理与生态工程建设提供有效的科学依据与支撑。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况、数据来源与处理

洞庭湖流域位于我国长江中游以南,南岭以北,介于 107° 16' E~114° 17' E, 24° 38' N~30° 26' N,流域面积达 26.3 万 km²,承担着调蓄长江、连接湘资沅澧“四水”的重要功能;流域覆盖了湖南省大部分区域以及湖北、贵州、广西、重庆等省市局部区域,整体上呈现“三面北开”的独特空间结构形态。流域属典型中亚热带季风湿润气候,四季分明,雨热同期,年均气温 16~17℃,年均降雨量 1200~1500mm,植被类型多以亚热带常绿阔叶林为主^[17]。

本研究所采用的 NDVI 数据来自于美国航空航天局(NASA)提供的陆地产品中的 MOD13A3NDVI 数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。时间跨度为 2000—2019 年,时空分辨率为 1km 和全月。数据运用 MRT 软件(MODISReprojectionTool)进行格式转换、投影转换及拼接处理等校正处理,并运用 ArcGIS 软件计算提取其生长季(4~10 月)的 ND-VI 数据,采用平均值合成法得到年尺度的 MODIS-NDVI 数据集。为进一步获得更加精准客观的数据,减少由于卫星的几何视场角和大气中霾、云以及数据合成过程中导致的数据误差,采用 S-G 滤波平滑法修正 NDVI 数据。

气象数据来源于国家地球系统科学数据中心的 2000—2019 年中国 1km 分辨率逐月平均气温与逐月降水量数据集(<http://www.geodata.cn>)。为确保数据运算的有效性,所有气温、降水和 NDVI 数据均重采样为 1km 栅格大小。另外,DEM 数据来源于地理空间数据云(Geospatial Data Cloud)的 ASTERGDEM30M 空间分辨率数字高程数据。土地利用数据源于中国科学院地理科学与资源研究所的 2000 和 2020 年全国 1km 多时相土地利用现状数据(<https://www.resdc.cn/>)。

1.2 研究方法

1.2.1 Sen+Mann-Kendall

Sen+Mann-Kendall 可在分析植被变化趋势空间分布特征时有效消除噪音干扰,且较好完成序列趋势的显著性判断。Sen 趋

势的计算公式为：

$$\beta = \text{mean}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

Mann-Kendall 可剔除异常值与缺失值的干扰性，增强研究方法的抗噪性，广泛运用于水文、气象与植被研究中，其统计检验方法如下所示：

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & (S > 0) \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$$

式中：Z 表示通过标准化检验的统计量；S 表示检验统计量； x_j 、 x_i 表示研究区时间序列；n 表示研究样本数量，当 $n \geq 8$, S 近似静态分布，其计算公式为：

$$E(S) = 0$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

1.2.2 Hhuurrsstt 指数

Hurst 指数可有效反馈 NDVI 时间序列的随机性和持续性且预测未来发展趋势。本研究采用 R/S 分析法计算植被生长季 NDVI 变化的 Hurst 指数。

指定一时间序列 $\{NDVI_t\}$, $t=1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义均值序列：

$$\overline{NDVI}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} NDVI_{t+i}, (\tau = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

累积离差：

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (NDVI_i - \overline{NDVI}_i), (1 \leq t \leq \tau) \quad (5)$$

极差:

$$R\tau = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(T, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(T, \tau) \quad (6)$$

$(\tau = 1, 2, 3, \dots, n)$

标准差:

$$S_t = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (NDVI_i - \overline{NDVI}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, (\tau = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

计算 Hurst 指数:

$$R_t / S_t = (a\tau)^H \quad (8)$$

式中: H 为 Hurst 指数, 在双对数坐标系 $(\ln R/S, \ln \tau)$ 中通过最小二乘法拟合求得。若 $H=0.5$, 表示未来变化趋势与过去变化情况无关; 若 $0 < H < 0.5$, 表示未来变化趋势与过去变化情况相反; 若 $0.5 < H < 1$, 表示未来变化趋势与过去变化情况一致; H 越接近 1, 持续性越强。

1.2.3 偏相关分析

偏相关分析可在 2 个特定变量均与第 3 个变量相关时, 去除第 3 个变量的影响, 其计算公式如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (9)$$

式中: $r_{xy,z}$ 表示变量 z 固定后; 变量 x 和 y 的偏相关系数 r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别表示变量 x/y 、 x/z 、 y/z 的简单相关系数; 并采用 $\alpha=0.05$ 的 t 检验对偏相关系数进行显著性检验。

1.2.4 残差分析

计算生长季 NDVI 与降水和气温的相关系数, 建立基于像元尺度的线性回归模型来预测生长季 NDVI, 得到仅有气候作用的植被生长季 NDVI 时间序列, 从而获得残差值, 即为人类活动对植被生长季 NDVI 的影响^[17], 具体公式如下:

$$NDVI_{pre} = a \times P + b \times T + C \quad (10)$$

$$NDVI_{CC} = NDVI_{pre} - NDVI_{real} \quad (11)$$

式中：NDVI_{pre}表示NDVI预测值；NDVI_{real}表示NDVI的真实值；a与b表示NDVI对降水和气温的回归系数；c表示回归常数项；P表示降水量；T表示气温。若NDVI_{cc}>0表示人类活动产生正面效应；NDVI_{cc}<0表示人类活动产生负面效应；NDVI_{cc}=0表示人类活动产生的影响比较微弱^[18]。

2 洞庭湖流域植被覆盖时空演变特征

2.1 植被覆盖年际变化分析

2000—2019年，洞庭湖流域植被生长季NDVI年际变化呈现分阶段波动上升趋势，最高值出现于2015年，最低值出现于2001年；年际增长速率为0.004/a (P<0.01)，说明在研究期内流域植被覆盖度增加显著，生态环境质量不断改善。

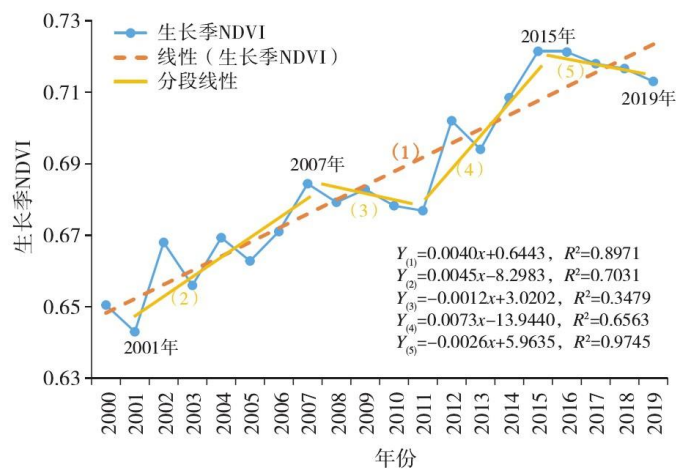


图1 2000—2019年洞庭湖流域植被生长季NDVI年际变化趋势

由图1可知，近20年间洞庭湖流域生长季NDVI整体呈上升趋势，大致呈现以下四个阶段特征：①2000—2007年为生长季NDVI持续增长阶段。2001年出现最低值的主要原因是，三峡工程建设导致长江上中游部分地区土地利用类型改变、地表植被遭到破坏^[19]。随后，洞庭湖流域跨入了丰水期加上三峡水库运行，降雨充足加上大量洲滩裸露，流域内植被长势良好，NDVI整体呈波动上升趋势。②2008—2011年为生长季NDVI波动下降阶段。该时段洞庭湖流域气候春旱和夏秋连旱多发^[20]。2008年极端异常的冰冻气候和2011年长江中下游发生了严重的冬季持续干旱与洪涝灾害^[21]，导致该时段内植被覆盖不断下降。③2012—2015年为生长季NDVI快速增长阶段。这主要是因为干旱与极端低温灾害过后，流域降水有集中趋势^[22]，伴随着洞庭湖生态经济区规划的实施、粮食作物的丰收与人工造林面积的增大，政策的利好显著提高了生长季NDVI的增长速度。④2016—2019年为生长季NDVI缓慢下降阶段。该时段内大规模的城市化运动和基础设施建设导致NDVI不断降低，但持续有效的生态治理政策延缓了植被覆盖下降速率，总体呈小幅波动下降变化。

2.2 植被覆盖空间分布特征

由图2可知，洞庭湖流域绝大部分区域植被覆盖状况良好，整体呈“西高东低”空间分布特征。参考前人研究成果^[11]将生长季NDVI分为高中低3个级别，其中生长季NDVI高值区 (>0.6) 主要分布在湖南西部武陵山区、雪峰山区，东部幕阜山脉、连云山脉，东南部罗霄山脉和南部南岭山地区。该区域动植物珍稀种类丰富，自2000年被列为重点生态保护区之后，植被覆盖度明显增加^[18]。生长季NDVI低值区 (<0.3) 主要分布在地势较低的平原与城镇聚集区，特别是流域东部冲积平原与流域沿线城镇化发展较快的大片区域与长株潭城市群。该区域虽降水量较高，但作为湖南省经济一体化发展的核心区域，其工业化程度相对较

高、人类活动强度较大，导致生长季 NDVI 数值普遍较低。另外，位于洞庭湖沿岸的岳阳、常德、益阳北部，以及湘中盆地的衡阳、邵阳东部，其植被覆盖也相对偏低。生长季 NDVI 中值区 (0.3~0.6) 多位于高山与平原之间的丘陵地带，包括湘南丘山区、湘中和湘东丘陵以及环洞庭湖农耕地等区域，覆盖了流域内大部分的农业耕地，这与湖南省较好的农业基础与国家推行的遏制土地撂荒政策密切相关。例如，位于洞庭湖滨的益阳市积极采取农村土地信托流转模式，盘活了大量闲置农用地资源，对农作物覆盖度的增加具有显著促进效应。

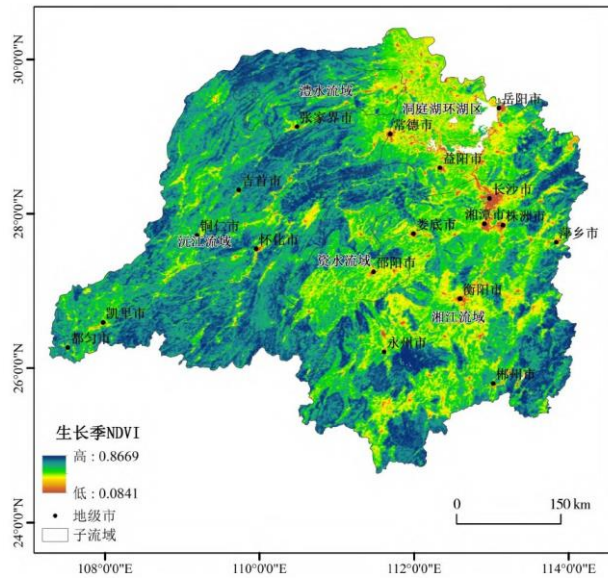


图 2 2000—2019 年洞庭湖流域植被生长季 NDVI 空间分布

2.3 植被覆盖变化趋势分析

采用 Sen 趋势分析，基于像元尺度计算生长季 NDVI 与相应时间序列的相关系数，得到生长季 ND-VI 年际变化趋势的空间分布特征 (图 3a)，并用 Mann-Kendall 方法对其进行极显著 ($p < 0.01$) 与显著 ($p < 0.1$) 检验 (图 3b)。结果显示：①流域内 94.08% 的区域植被覆盖呈上升趋势。在空间分布上表现为西部强于东部、南部强于北部，这与东部与北部的人类活动较为密集直接相关。②显著与极显著增加面积占研究区总面积 84.26%，主要分布于洞庭湖湿地、湘西局部高山区以及长江沿线周边地区。这主要得益于流域沿线农作物覆盖面积稳定与近年来国家大力推广的生态工程建设。③ND-VI 整体呈减少面积占研究区总面积 5.92%。其中，1.75% 的区域呈显著降低趋势，主要分布在经济较发达的城市群以及中部局部地区。城镇化的不断扩张与经济的高速发展导致大量耕地被占用且地表植被遭到破坏，是降低植被覆盖率的直接因素^[23]。总体来说，2000—2019 年洞庭湖流域植被覆盖整体变化呈明显上升趋势。

如图 4a 所示，2000—2019 年洞庭湖流域生长季 NDVI 的 Hurst 指数平均值为 0.470，具体数据范围为 0.1044~0.9638，大于 0.5 的区域占总面积的 84.74%。结果表明流域内植被变化的同向特征强于反向特征，相反趋势变化不明显。参考前人研究成果对 Hurst 指数进行分级^[24]，结果显示：高值区 ($H > 0.65$) 主要分布在流域南部的南岭山地、北部的环洞庭湖农耕地以及贵州的都匀市至凯里市沿线区域，反映出研究区植被 NDVI 过去与未来变化趋势具有高度的同向性；低值区 ($H \leq 0.35$) 主要分布在湘中盆地的衡邵干旱走廊，反映出研究区植被 ND-VI 过去与未来变化趋势具有一定的反向性。

为了揭示长江流域植被覆盖变化趋势及其持续性，将植被生长季 NDVI 变化趋势与 Hurst 指数进行叠加耦合分析，得到变化趋势与持续性的耦合信息 (图 4b)：①未来流域植被生长季 NDVI 由增变减面积占比为 61.47%，表示流域未来植被增长趋势可能

放缓,整体发展可能向退化方向改变,这与桑国庆等^[26]研究结论基本一致。该区域主要分布于湘西、湘中、湘南等大片区域,可能是由于近年来国家大力开展生态治理工程建设,生态效应在相对较短时间内得到了明显恢复,但由于生态效应边际递减叠加未修复生态区具有一定的修复难度,导致未来植被由增变减区域较大,生态修复难度增加。②持续增加面积为 32.87%,主要分布在流域西南部的都匀市、凯里市,南部的南岭山地区,西部的雪峰山以及澧水流域,是我国生态保护与生态治理的重点区域之一。③由减变增面积占比为 2.82%,主要分布在流域北部的长江沿线区域。这主要得益于洞庭湖北部地区长江补水工程、长江中游防护林工程等各类生态修复工程的全面开展。④持续减少面积占 2.84%,主要分布在长株潭城市群、环洞庭湖城镇开发区以及衡阳盆地。该区域处于经济快速发展地带,植被覆盖指数不可避免地呈现出持续减少趋势。特别是湖区沿线与经济较发达区域由于呈持续减少特征需重点关注,应为下一步生态工程建设的重点区域。

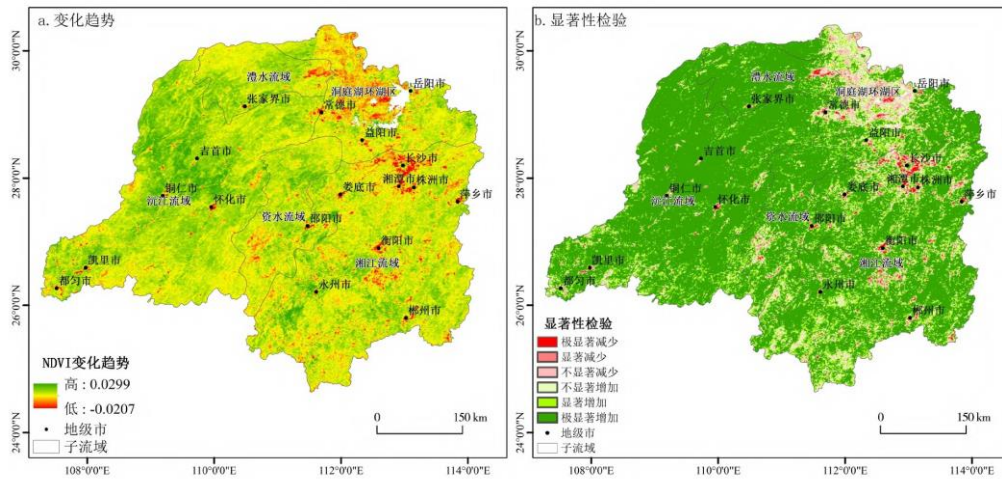


图 3 2000—2019 年洞庭湖流域植被生长季 NDVI 变化趋势及显著性检验

3 洞庭湖流域植被覆盖变化气候驱动因素分析

3.1 植被生长季 NDVI 与降水相关关系

水分是主导植物生长的重要因子。本研究通过计算 2000—2019 年洞庭湖流域植被生长季 NDVI 与同期降水之间的偏相关系数,并根据最大相关系数得出该流域降水变化响应的空间分布特征(图略),同时利用 T 检验法进行显著性检验(图 5)。洞庭湖流域植被生长季 NDVI 与降水的最大相关系数为-0.7606~0.8472。植被生长季 NDVI 对降水变化的响应强度呈现明显的地域差异,主要表现为西高东低。研究结果表明,洞庭湖流域植被生长季 NDVI 与降水相关关系为正的区占总面积 90.7%,说明该区域植被与降水二者间的关系主要为正相关。

根据图 5a,近 20 年间洞庭湖流域大部分区域生长季 NDVI 与降水呈不显著正相关,流域西部武陵山区呈正相关明显,而环湖沿线经济发达的城镇化区域则负相关明显。具体研究结果为:①呈正相关的区域占总面积 90.7%,呈极显著和显著正相关的区域分别为 4.49%和 11.86%,主要分布在流域西部的武陵山区以及贵州都匀市和凯里市。该区域水分是促进植被生长的主要因素,受生态林业工程影响植被覆盖程度呈逐年递增趋势。②呈极显著和显著负相关的区域占总面积 0.18%,主要分布于河湖水域附近、洞庭湖区、环洞庭湖沿线城市群以及国家重点开发经济区。由于该区域降水量较大导致洲滩地多被雨水覆盖,对植被生长产生了明显抑制作用。此外,城市经济建设区普遍人口密集、经济建设活动频繁,降水量较大但植被覆盖变化不显著,呈典型负相关分布特征,特别是以长株潭城市群为典型代表^[25]。

3.2 植被生长季 NDVI 与气温相关关系

气温是影响植物生长的必要因素与条件之一。洞庭湖流域植被生长季 NDVI 与气温最大相关系数为-0.8792~0.8792，其主要特征表现为“正负相关并存、空间异质性明显”，其响应强度则呈由西向东南方向延伸的“强—弱—强”空间布局特征。降水和气温均与洞庭湖流域植被生长季 NDVI 呈正相关关系。相对而言，气温对流域植被生长的正向促进作用强于降水，反映出该区域植被生长与气温的相关性更加显著。

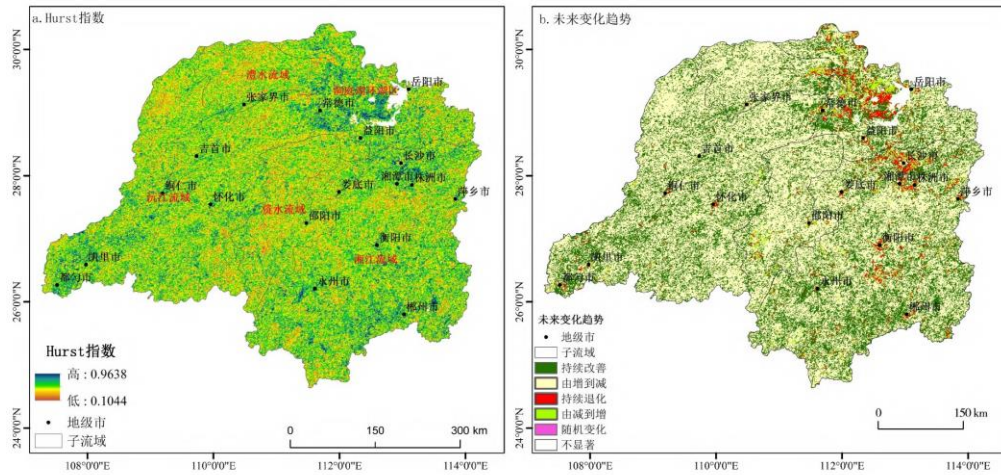


图 4 2000—2019 年洞庭湖流域植被生长季 NDVI 未来变化趋势图

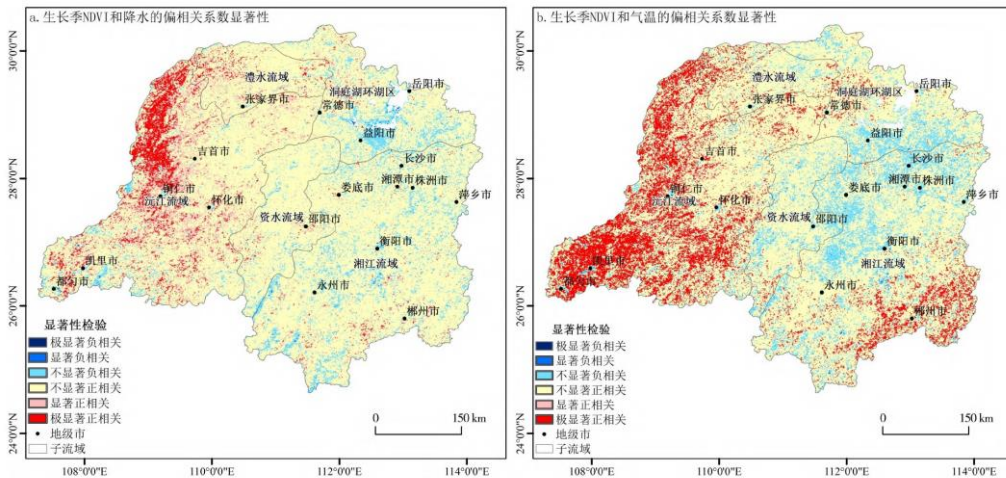


图 5 2000—2019 年洞庭湖流域生长季 NDVI 与降水、气温的显著性检验

研究表明，洞庭湖流域植被生长季 NDVI 气温驱动区域具有“东部负相关明显，西部正相关明显”的空间分布特征。如图 5b 所示：①与气温相关系数为正的区占总面积 85.06%，其中呈极显著和显著正相关的区域分别为 7.41%和 7.37%，主要分布在流域西部武陵山区和东南部罗霄山区。该区域多为气温低值区，植被分布主要呈垂直地带性规律，温度上升对延长植被生长季、提高光合作用、扩大植被生长面积等方面具有明显的促进作用^[26]。②与气温相关系数为负的区域占研究区总面积 14.95%，主要分布于流域东部海拔相对较低的平原与湘江流域沿线及河谷区域，包括长沙、常德、益阳、岳阳等气温高值区。高温会加快土壤水分蒸发而引发干旱，抑制植物的生长。③值得关注的是，衡阳干旱走廊也是植被生长季 NDVI 与气温呈负相关的分布区域。该区域是湘中盆地群两个最大盆地（衡阳盆地和邵阳盆地）的连接带，从东南沿海刮来的湿润季风气流很难越过高大的山脉而进入盆地，造成区域内雨水较少。因此，气温对降水本就稀少的衡阳干旱走廊植被生长具有明显的抑制作用。

4 洞庭湖流域植被覆盖变化人类活动驱动因素分析

4.1 植被生长季 NDVI 残差变化趋势分析

残差分析法可分离出人类活动对洞庭湖流域植被覆盖的贡献因子，反映出人类活动对植被覆盖的影响性。2000—2019 年洞庭湖流域 NDVI 残差值空间分布结果表明，流域残差变化正面效应区域远大于负面效应区域，说明近 20 年间生长季 NDVI 残差总体呈上升趋势（图 6）。其中，呈极显著增加的区域主要集中在流域西部武陵山区、中部雪峰山区、湘南低岗丘陵区 and 湘北幕阜山与连云山等地区。该区域植被覆盖以森林为主且保护程度较好，人类开发活动相对较少，自然林与人工林覆盖面积快速增长，远超植物退化面积^[14]，人类活动正影响效应明显。其次，流域南部传统农耕区 NDVI 残差增长显著。先进的农业生产技术与农田水利设施建设使农耕区呈现出 NDVI 植被覆盖与农作物产量同向变化趋势。此外，湘东平原区、湘江流域沿线及河谷等区域 NDVI 也呈极显著增加趋势。

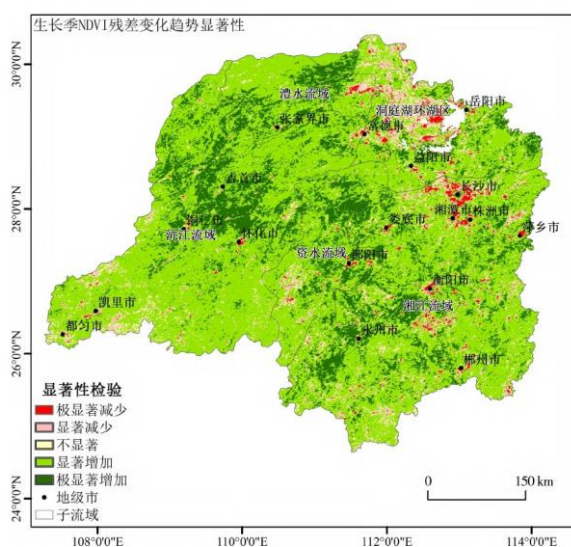


图 6 2000—2019 年洞庭湖流域植被生长季 NDVI 残差变化趋势显著性检验图

残差变化为负面效应的区域为人类活动对植被覆盖产生破坏作用的区域。结果表明，NDVI 残差呈显著减少的区域主要为湘北、湘东平原一带，其中以长株潭城市群和京广、沪昆铁路沿线的地级市为代表的城市建成区为主。该区域普遍为湖南省经济增长较快的城市区域，为社会经济与人类活动密集区且覆盖农牧耕作区，人类活动对植被 NDVI 的增长具有一定的破坏作用。近年来，城市群、都市圈、经济带等概念的快速发展不断推动着城市扩张的速度，特别是城市周边大量的林地、耕地、草地被转变为建设用地以满足城市不断扩张的需求，直接导致城镇周边区域 NDVI 的显著减少、残差为负。

4.2 农业生产对植被覆盖变化影响分析

农业生产与植被覆盖变化的关系极为密切。洞庭湖流域具有大量典型的农业灌溉区，尤其是平原与丘陵地带分布了大量的农业耕地，使人类活动成为农业生产区生长季 NDVI 变化的主要影响因素。如图 7a 所示，2000—2019 年洞庭湖流域粮食产量总体呈分阶段上升趋势，对比同期生长季 NDVI 变化具有明显的同向性特征，二者呈现显著相关性 ($r=0.734, P<0.01$)。图 7b 为洞庭湖流域生长季 NDVI 与农作物总耕地面积的关系图，二者间关联性特征明显，呈显著相关性 ($r=0.539, P<0.05$)。可见，农业生产对洞庭湖流域植被覆盖变化具有显著的正面效应。

4.3 生态工程对植被覆盖变化影响分析

生态工程的全面实施在一定程度上降低了自然因素对植被变化的影响，增强了植被变化的人为可控性因素^[27]。洞庭湖流域作为长江重要的子流域，是我国生态工程的重点建设区域，得益于 21 世纪起始的洞庭湖流域生态保护修复工程，流域植被覆盖变化发生了明显的正向效应。如图 8 所示，随着造林面积的增加，流域 NDVI 呈现出逐年上升趋势，人工造林面积与生长季 NDVI 变化呈显著相关性 ($r=0.688, P<0.01$)。特别是 2003 与 2015—2019 年人工造林面积相对较多，对比同期 NDVI 增速明显较快，表明洞庭湖流域生态工程建设对植被覆盖变化产生了积极促进效应。

4.4 土地利用变化对植被覆盖变化影响分析

土地利用变化能直观反映地理空间中人与环境的相互作用^[28]。2000—2020 年洞庭湖流域约有 10710km² 土地利用类型发生了变化。其中，以耕地与林地变化为主，面积分别为 4242km² 与 3169km²。当中，45.5% 的耕地转变为建设用地，33.3% 的耕地转变为林地；42.1% 的林地转变为建设用地，37.6% 的林地转变为耕地。建设用地为转入面积最多的土地利用类型，累计转入约 3452km²，主要用于城市扩张与城市群建设，占用耕地（贡献率为 55.4%），林地（贡献率为 38.62%），草地（贡献率为 3.21%）。

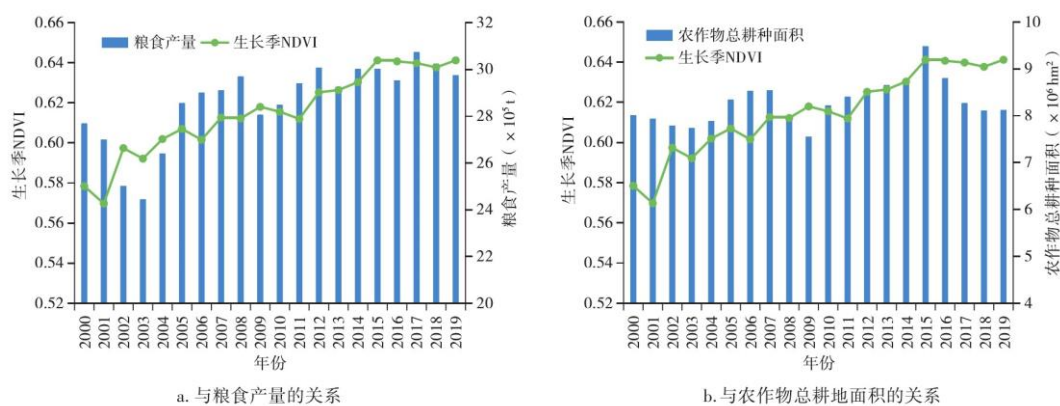


图 7 2000—2019 年洞庭湖流域生长季 NDVI 与粮食产量、农作物总耕地面积的关系

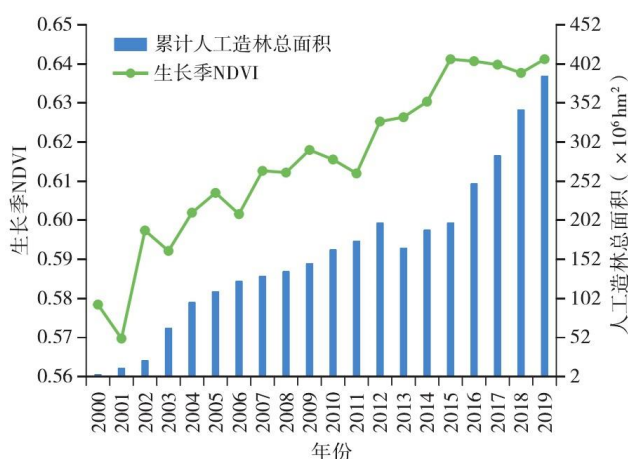


图 8 2000—2019 年洞庭湖流域生长季 NDVI 与人工造林总面积的关系

如图 9 所示，土地利用变化对植被变化影响具有明显的正负双重效应。一方面，建设用地的大量转入导致地表植被遭受一定程度的破坏。流域北部、环湖沿线、湘江沿线、长株潭城市群等区域土地利用类型改变较大，特别是长株潭城市群区域建设用地扩张明显。大量的耕地、林地转化为建设用地服务于快速发展的城市化进程，植被覆盖度明显降低。另一方面，流域新增林地与耕地面积对植被覆盖度的增加具有明显促进作用。流域内新增林地主要集中于湘江沿线湖南省桂东县、沅江流域重庆市境内酉阳苗族自治县等区域；新增耕地主要集中在湖区湖南省华容县、南县等地区。此外，流域内各大水系均有小范围轻度扩大，但人口密集的洞庭湖区沿线水域则呈萎缩趋势。

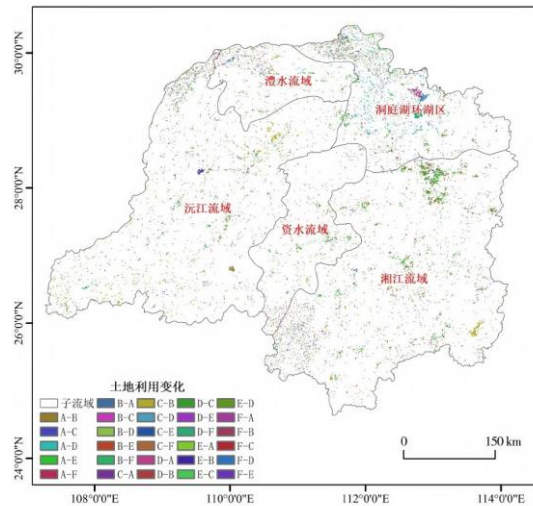


图 9 2000—2020 年洞庭湖流域土地利用类型变化的空间分布

注：A 表示耕地，B 表示林地，C 表示草地，D 表示水域，E 表示建设用地，F 表示未利用地。

4.5 城市扩张对植被覆盖变化影响分析

城市建设用地的大量增加表明近年来洞庭湖流域城市扩张速度明显加快。目前，以城市群为大尺度的城市扩张模式已成为我国城市发展的主体形态^[29]，必然对周边地表植被覆盖产生一定程度的破坏。以长株潭城市群为例，生成 15 个 1km 为间隔的缓冲区，采取土地利用转移矩阵并叠加残差趋势来分析城镇化过程中人为因素对植被覆盖的影响（图 10）。长株潭三市由非建设用地转变为建设用地的已建成经济开发区，其周边大部区域 NDVI 均呈下降与残差减少趋势。本研究通过将残差减少趋势的图斑叠加土地利用变化图斑（非建设用地—建设用地），得到其耦合重叠度为 41.67%，说明城市扩张是导致 NDVI 减少的主要驱动因素之一。特别是城市重点开发区域周边均呈残差减少趋势，符合城市圈层外围扩张趋势，应为未来城市扩展建设与生态保护的重点区域。针对此类区域应基于三重底线原则（Triple BottomLine）对其经济底线、环境底线与社会底线进行全面审视，最大程度降低 NDVI 的未来减少面积，达到城市扩张与环境保护的协调统一，实现经济发展、生态保护、社会福利的“三重盈余”。

5 结论与协同治理模式建议

本研究主要结论与学界前人相关研究结论基本相似，目前洞庭湖流域大部分区域植被覆盖状况良好^[14]，降水和气温变化均呈正相关^[30]，建设用地呈持续增加且扩张明显趋势^[30]，未来流域大部区域植被 NDVI 变化可能呈增长放缓或退化趋势^[26]，但也存在一定研究成果，包括年际变化的分阶段波动上升、气温对植被生长的正向促进作用强于降水、未来植被增长趋势可能放缓的原因，以及人类影响因素与流域植被变化关系等方面，为湖区生态环境协同治理模式构建提供了有效支撑。

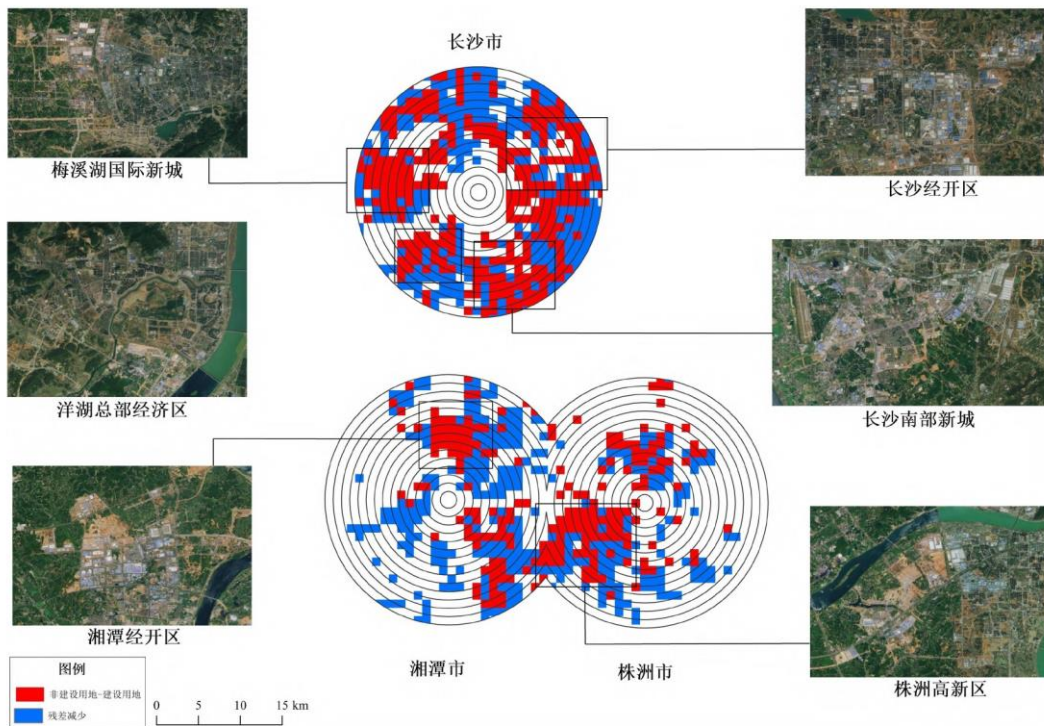


图 10 长株潭三市土地利用变化叠加残差趋势图

5.1 结论

①年际变化上，洞庭湖流域生长季 NVDI 呈分阶段波动上升趋势，说明研究期内流域植被覆盖增加显著。2001 年最低值的出现可能是由于三峡工程建设导致长江上中游部分地区土地利用类型改变、地表植被遭到破坏；2015 年最高值的出现或是由于新增林地与耕地面积等政策的正向促进作用。

②空间分布上，洞庭湖流域大部分区域植被覆盖状况良好，呈“西高东低”分布特征；变化趋势上，流域植被覆盖增加区域明显大于减少区域，具体表现为西部强于东部、南部强于北部，该现象或与东、北部人类活动较为密集直接相关。未来变化上，流域大部区域植被 NDVI 变化可能呈增长放缓或退化趋势，特别是湖区沿线与经济较发达区域呈持续减少特征。

③气候影响因素上，洞庭湖流域植被 NDVI 与降水和气温变化均呈正相关，但气温对植被生长的正向促进作用强于降水。其中，对降水变化的响应强度具有“西高东低”的明显地域差异；对气温变化的响应强度具有由西向东南依次呈现的“强—弱—强”空间分布特征。

④人类影响因素上，农业生产与生态工程建设对流域植被变化具有正面效应；土地利用变化对植被覆盖具有双重影响作用；城市扩张则是导致 ND-VI 减少的主要因素之一。目前，流域大部分地区生长季 NDVI 残差呈增长趋势，说明人类活动对植被覆盖的正面效应明显强于负面效应；但湖区沿线、经济较发达地区与重点开发区周边均呈残差减少趋势，应为未来人类活动干预的重点区域。

5.2 围绕人地协调探索流域生态协同治理新模式

科学认知人类活动与地域系统的互动关系是实现人地关系协调发展的重要依据。城镇化发展是绿色化发展水平的天然基础^[31]，区域植被覆盖率、城镇经济发展实力与区域绿色发展水平密切相关，更对生态协同治理水平产生着较强的影响性。基于上述研究成果，未来洞庭湖流域生态治理工作应注重以下几个方面：①湖区应继续推进扩大新增林地与耕地面积等相关政策，制定相应人工造林补贴、农业支持保护补贴与耕地地力保护补贴等相关措施，保证湖区生态环境的绿色正向发展。②湖区东、北部经济活动相对密集，未来植被覆盖呈持续减少特征，应为生态治理的难点与重点区域。基于植被对降水变化响应的地域差异与对气温变化响应强度的空间分布特征，应在流域西部的武陵山区以及贵州都匀市和凯里市加强自然降水监控且适时进行人工降水补充；对海拔相对较低的平原与湘江流域沿线等气湿高值区，应避免由高温干旱所引起的负向影响，特别应关注衡邵干旱走廊区域。④针对城市扩张的重点领域，相应的生态治理工作应针对洞庭湖流域的现实状况，充分考虑“水土流失、生态空间不足、跨区行政壁垒”等问题，从我国特有的多层次核心政治体制出发，结合“点面型”与“交叉型”的生态治理特征，重构流域生态环境协同治理体系。

生态治理的复杂性要求多主体、多层级间的相互协作。流域生态协同治理模式应从高位统筹、机构设置、人员安排、运行机制、经费投入等方面入手，通过强化生态治理意识完善治理制度、机构与体系的构建。首先，应明确协同治理主体。通过厘清政府、市场、社会所拥有的生态产品与生态权益，构建“有为政府、有效市场、有机社会”三位一体的生态协同治理新格局。其次，应根据我国现行的权责分配制度，构建由湖南、湖北、贵州、广西、重庆等流域沿线省份组成的同级不同政府间“竞合一体”的生态治理府际关系，将主体协同绩效与博弈关系网络融入治理体系构建范畴，重塑府际生态治理权力配置结构，提高生态公共服务效益。再者，在协同治理的具体实施层面，或可采取以治理问题库为载体的形式，建立任务驱动型协同治理模式，有效协调多方利益诉求，实现主体协同与过程协同的整体联动。

参考文献:

[1]杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3567-3578.

[2]Hou W, Hou X Y. Spatial-temporal changes in vegetation coverage in the global coastal zone based on GIMMS NDVI3g data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(3):1118-1138.

[3]Liu H, Zhang M, Lin Z, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256:10-21.

[4]Seddon A, Macias F M, Long P. et al. Sensitivity of Global Terrestrial Ecosystems to Climate Variability[J]. Nature, 2016, 531(7593):229-232.

[5]丁海勇, 丁昕玮. 基于 SPOT_NDVI 的甘肃省植被覆盖变化及其与气候、地形因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12):2665-2678.

[6]Sun Y L, Shan M, Pei X R, et al. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2020, 115:102834.

[7]Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. Greenness in semiarid areas across the globe 1981-2007: An earth observing satellite based analysis of trends and drivers[J]. Remote Sensing of Environment 2012, 121:144-158.

-
- [8]Mohammad A,Wang X,Xu X,et al.Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia[J].Agricultural and Forest Meteorology,2013,178:21-30.
- [9]信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D辑:地球科学),2007(11):1504-1514.
- [10]穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [11]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.
- [12]邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J].自然资源学报,2018,33(3):425-438.
- [13]金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.
- [14]孙颖,尹少华.长江经济带生态一体化协同治理的机制创新[J].中南林业科技大学学报:社会科学版,2021,15(2):26-33.
- [15]雷倩,章新平,黎祖贤,等.洞庭湖流域生长季气象特旱对植被覆盖的影响[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):187-199.
- [16]柴茂.洞庭湖区生态的政府治理机制建设研究[D].湘潭:湘潭大学,2016.
- [17]Envans J,Geerken R.Discrimination between climate and human-induced land degradation[J].Journal of Arid Environments,2004,57(4):535-554.
- [18]刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [19]袁沫汐,邹玲,林爱文,等.湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(17):5315-5323.
- [20]李景刚,黄诗峰,李纪人,等.1960—2008年间洞庭湖流域降水变化时空特征分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2010,8(4):275-280.
- [21]胡毅鸿,李景保.1951—2015年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J].农业工程学报,2017,33(7):107-115.
- [22]张晓艳,刘梅先.洞庭湖流域降雨和降雨极值时空分布及风险变化研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2016,39(2):10-15.
- [23]Zheng K Y,Tan L S,Sun Y W,et al.Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change:Evidence from typical areas in China[J].Ecological Indicators,2021,126:107648.

-
- [24] 桑国庆, 唐志光, 邓刚, 等. 基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5):1100-1109.
- [25] 胡顺石, 彭雨龙, 秦建新, 等. 长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J]. 经济地理, 2019, 39(12):178-186.
- [26] 肖强, 陶建平, 肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2016, 36(23):7594-7602.
- [27] Zhou X Y, Shi H D, Wang X R. Impact of climate change and human activities on vegetation coverage in the Mongolian plateau[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4):604-610.
- [28] 杨伶, 邓敏, 王金龙, 等. 近 40 年来洞庭湖流域土地利用及生态风险时空演变分析[J]. 生态学报, 2021, 41(10):3929-3939.
- [29] 董晨炜, 曹宇, 谭永忠. 基于夜间灯光数据的环杭州湾城市扩张及植被变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1):231-238.
- [30] 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.
- [31] 熊曦, 张陶, 段宜嘉, 等. 长江中游城市群绿色化发展水平测度及其差异[J]. 经济地理, 2019, 39(12):96-102.