DOI: 10.5846/stxb202111193266
易浪,孙颖,尹少华,魏晓,欧阳晓.2000—2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素.生态学报,2023,43(2):798-811.
Yi L,Sun Y,Yin S H,Wei X,Ouyang X.Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019.Acta Ecologica Sinica,2023,43(2):798-811.

2000—2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素

易 浪[1,2],孙 颖[1],尹少华[3,*],魏 晓[2],欧阳晓[2]
1 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410004
2 湖南财政经济学院 湖南省经济地理研究所, 长沙 410205
3 中南林业科技大学 商学院, 长沙 410004

摘要:长江流域作为中国重要的生态屏障,科学认识长江流域植被覆盖时空变化及其驱动因素,对有效开展长江流域生态工程建设具有重要的指导意义与应用价值。基于 2000—2019 年间 MODIS-NDVI 与相关气象等数据,采用 Theil-Sen median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、变异系数、偏相关分析、残差分析等方法,研究了近 20 年来长江流域植被覆盖的时空分布与变化特征,并探究了研究区植被覆盖的驱动因素。结果表明:(1)时间变化上,长江流域生长季 NDVI 呈现波动增长趋势,显著改善面积大于退化面积;(2)空间分布上,流域植被覆盖空间分布格局大致呈现为“中部高,东西低”,生长季 NDVI 多年均值为 0.6164,呈较高植被覆盖状态;(3)变化趋势上,植被增长区域大于减少区域,具体表现为“中部强于东部、东部强于西部”;(4)变化稳定性上,流域植被变异系数介于 0.0104—1.3199 之间,呈现出“中间低,东西高,东西部局部区域高低波动并存,地域性差异明显”的空间变化稳定性特征;(5)影响因素上,流域植被覆盖变化受气温和降水的共同影响,大部分区域生长季 NDVI 变化以气候驱动为主,局部区域表现自然因素叠加人为因素作用的共同驱动,残差分析显示人类活动对长江流域植被覆盖以正效应为主。

关键词:长江流域;植被覆盖;时空动态;气候响应;人类活动

Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019

YI Lang[1,2],SUN Ying[1],YIN Shaohua[3,*],WEI Xiao[2],OUYANG Xiao[2]
1 *College of life science and technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha* 410004, *China*
2 *Hunan Institute of Economic Geography,Hunan University of Finance and Economic, Changsha* 410205, *China*
3 *School of Business, Central South University of Forestry and Technology, Changsha* 410004, *China*

Abstract: The Yangtze River Basin is an important ecological barrier in China. Scientific understanding of the spatial-temporal variations of vegetation coverage and associated driving forces in the Yangtze River Basin are of great significance and application value for the effective development of ecological engineering construction for Yangtze River Basin. Based on MODIS-NDVI data and meteorological data from 2000 to 2019, this study investigated the spatio-temporal variation and change characteristics of vegetation coverage in the Yangtze River Basin during past 20 years, and the driving factors of vegetation coverage in the study area was explored by using the methods of Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, coefficient of variation, partial correlation analysis and residual analysis. The results are as follows: (1) in terms of time scale, the NDVI in the growth season of the Yangtze River Basin showed a fluctuating growth trend, and the

基金项目:湖南省自然资源厅科技项目经费资助(2022-49);2020 中南林业科技大学生态学博士后科研启动基金项目(45200012-253260);2019 国家社科基金项目(19BJY045)
收稿日期:2021-11-19; **网络出版日期**:2022-10-11
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yinshaohua001@163.com

significantly improved area was larger than the degraded area; (2) In terms of spatial distribution, the spatial distribution pattern of vegetation coverage appears as characteristics of "high in the middle and low in the east and west" in the Yangtze River Basin. The multi-year average value of the NDVI in the growing season is 0.6164, showing a high vegetation coverage state; (3) In terms of change trend, the vegetation growth area is larger than the decrease area, which is specifically expressed as "the central region is stronger than the east, and the east is stronger than the west"; (4) In terms of change stability, the coefficient of variation is between 0.0104 and 1.3199, showing the characteristics of "low in the middle, high in the east and west, high and low fluctuations in local areas of east and west, and obviously regional differences" for the spatial variation of stability; (5) In terms of influencing factors, the change of vegetation cover in the Yangtze River Basin was affected by both climate and precipitation. In most regions, the change of NDVI in the growing season was mainly driven by climate, while in some regions, it was driven by the combination of natural factors and human factors. Residual analysis showed that human activities had a positive effect on vegetation cover in the Yangtze River Basin.

Key Words: Yangtze River Basin; vegetation coverage; spatio-temporal dynamics; climate response; human activity

植被在维护陆地生态系统碳平衡与气候系统的能量平衡间发挥着关键作用,一定程度上可反映区域生态环境的总体情况,为地表其他生物的生存提供良好的栖息环境[1]。大范围内的地表植被覆盖变化可客观反映区域自然资源、气候变化以及人类活动的相互作用[2]。随着全球变化的不断加速,动态监测植被覆盖变化逐渐成为应对全球气候变化和制定环境政策的热门领域之一[3—4]。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index)能客观反映地表植被覆盖的丰度与变化状况,是用于监测全球范围内地表植被覆盖与生态环境变化的有效指标[5]。植被覆盖在全球范围内呈改善趋势[6],且在北半球的中高纬度地区尤为突出[7]。近年来,国内外学者基于 NDVI 数据对植被覆盖时空变化与驱动因素进行了大量研究,植被与气候关系研究是人类应对未来气候变化与完善生态系统功能的重要依据[8]。地表植被覆盖变化与区域气候因子紧密关联,而温度与降水因子对其影响尤为显著[9]。植被覆盖变化对气候因子影响的响应涉及多个生态系统的理化和生物过程,需从多要素、多过程的综合效应进行全面研究[10]。现有研究表明,植被覆盖变化的驱动因素主要表现为气候变化和人类活动[11],其中降水和气温是影响植被变化的主要气候因子[12—13],人类活动则多聚焦于其对植被覆盖的正负效应研究[14—15]。同时,区域差异导致植被覆盖与气候变化和人类活动的关系存在较强的空间差异性[16]。

长江流域复杂多变的流域气候特征孕育了丰富多样的生态系统类型,气候和非气候要素对植被覆盖变化的空间差异影响显著,是研究植被覆盖变化对气候响应与人类活动的理想区域之一。随着全球气候变暖和人类活动加剧,长江流域生态环境压力陡增,生态安全屏障功能面临巨大挑战。在气候变化和人类活动双重因子的作用下,长江流域植被覆盖变化受到国内外学者的广泛关注[17]。Chen 等[18]研究指出近几十年间长江流域植被呈增长趋势。张亮等[19]指出气温是长江流域近 30a 植被覆盖度年际变化的主要影响因素。杨少康等[20]与邓元杰等[21]发现年长江中上游流域生长季植被覆盖度呈显著上升趋势,人类活动正值区域明显高于负值区域。我国自 2000 年针对长江流域开展的一系列退耕还林还草工程和天然林保护工程对流域植被覆盖结构产生显著影响。此外,长江流域植被覆盖变化受水电站开发建设、城市化进程等人类活动干扰强烈。当前,关于长江流域长时间序列的植被覆盖时空变化研究多集中在子流域,涉及全流域植被变化及其对气候和人类活动的影响研究尚且不足,对流域植被覆盖变化规律与形成机理的认识有待深入。因此,了解植被状况对气候变化和人类活动的响应非常重要。以往的研究多关注长江流域植被 NDVI 对水热条件的响应分析;气候变化和人类活动对长江流域植被变化的植被覆盖时空变化及驱动因素定量研究较少,人类活动对植被影响的认识不足可能会无法正确评估植被覆盖状况。因此,有必要分析长江流域植被覆盖的时空演化,评估气候变化和人类活动对植被覆盖动态的影响,以期为区域生态恢复评价提供依据。基于此,本文的研究目的是:(1)分析长江流域植被覆盖的时空演化;(2)探讨分析植被与气候因子之间相互关系的演变特征;(3)评估分

析气候变化和人类活动对长江流域植被变化的影响。

本研究采用 2000—2019 年间 MODIS-NDVI 与相关气象等数据,对近 20 年来长江流域植被覆盖变化和空间格局展开分析,系统深入探讨流域植被覆盖的时空演化和驱动因素,定量分析植被覆盖对气候和非气候要素变化的响应,评估植被覆盖变化与气候变化和人类活动的关系,总结归纳出长江流域植被覆盖变化的空间异质性及阶段性特征,以期为长江流域生态工程建设提供有效的参考与借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江流域指长江干流和支流流经的广大区域,介于 90°30′—122°25′E、24°30′—35°45′N 之间,流域总面积达 180 万 km^2,占中国国土面积的 18.8%。长江发源于唐古拉山,横跨中国三大地形阶梯,自西北向东南流经青海省、四川省、云南省、重庆市、湖南省、安徽省上海市等 19 个省、市、自治区。横贯中国东部、中部和西部三大经济区,素有黄金水道之称。长江流域复杂的地形地貌、丰富的自然资源和多变的气候类型孕育出流域丰富多样的生态系统类型。

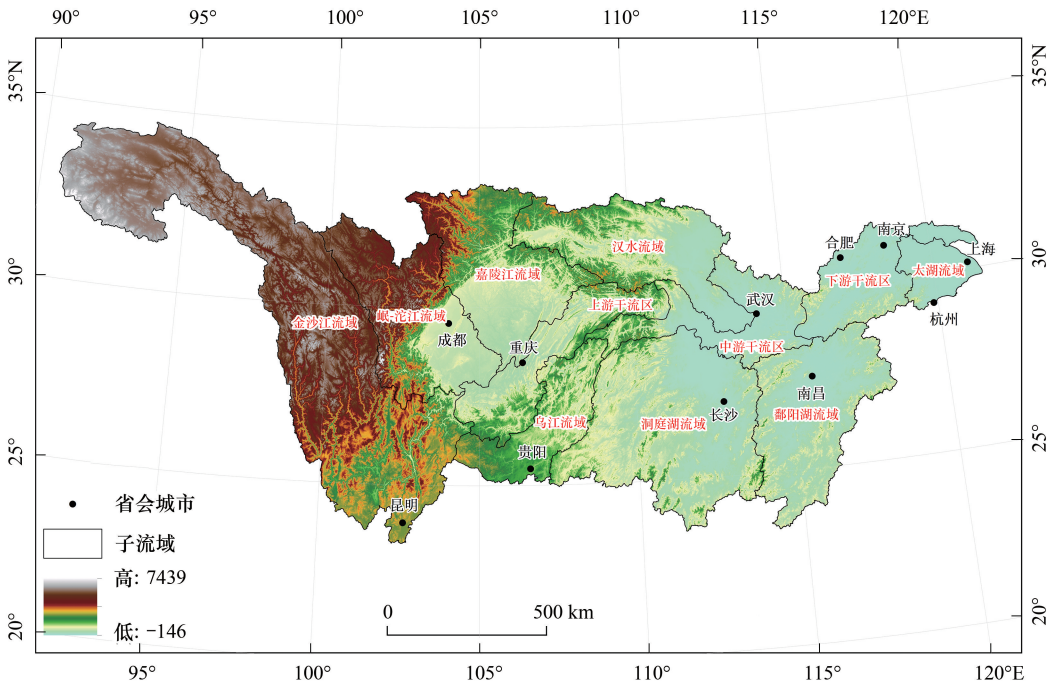

图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源与处理

本研究采用的 NDVI 数据来源于美国航空航天局(NASA)EOS/MODIS 数据产品中的 MOD13A3 NDVI 数据(https://ladsweb.Modaps.Eosdis.nasa.gov),时空分辨率分别为 Monthly 和 1km,时间跨度为 2000 年至 2019 年。利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对所获数据进行格式转换、投影转换及拼接等预处理,选取植被生长季(4—10 月)的 NDVI 数据进行分析,通过 Arcgis10.3 软件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,本研究采用 S-G 滤波平滑法进一步修正生长季 NDVI 数据。

气象数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)的 2000—2019 年中国 1km 分辨率逐月平均气温和逐月降水量数据集。为保证数据的有效运算,选取 4—10 月的气温

和降水数据采用平均值合成法生成年值数据,同时气温、降水和 NDVI 数据均重采样为 1km 栅格像元。此外,DEM 数据来源于地理空间数据云的 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据。为提高分析准确性,土地利用数据采用 2000 和 2018 年中国科学院地理科学与资源研究所的 30m 多时相土地利用现状数据(https://www.resdc.cn/)。

1.3　研究方法

(1)Theil-Sen Median 趋势分析是一种用于长时间序列数据稳健的非参数统计的趋势计算方法[22]。计算公式为:

$$\beta = \mathrm{mean}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \tag{1}$$

式中:x_j,x_i为序列数据。若β>0 时表示上升趋势;反之表示下降趋势。

Mann-Kendall 可判断趋势显著性,公式见文献[15]。式中,当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时,表示趋势分别通过了置信度为 90%、95%和 99%的显著性检验。

(2)变异系数。反映数据的时间序列上的离散程度,可用来反映植被覆盖的波动程度[23]。计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma_{\mathrm{NDVI}}}{\overline{\mathrm{NDVI}}} \tag{2}$$

式中:CV 表示某时间序列的变异系数;σ_{NDVI} 为标准差;$\overline{\mathrm{NDVI}}$ 为均值;CV 值越大说明生长季 NDVI 波动程度越大,植被覆盖越不稳定;反之则说明植被覆盖越稳定。

(3)偏相关分析。指控制其他变量的线性影响条件下分析两变量间的相关性[24]。在计算偏相关系数前,先计算两要素之间的相关系数。公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中,r_{xy}为变量 x 与 y 之间的相关系数,n 为样本数,$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两个变量的平均值。偏相关系数计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \tag{4}$$

式中:$r_{xy,z}$表示固定变量 z 后,变量 x 和 y 的偏相关系数 r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}分别为变量 x/y、x/z、y/z 的简单相关系数,采用 $a=0.05$ 的 t 检验对偏相关系数进行显著性检验。

(4)残差分析。通过 NDVI 与气候因子的回归分析得到 NDVI 的预测值,遥感观测的实测值与预测值的差为剩余价值即为残差,从而量化人类影响对植被生长的影响。具体公式参见相关文献[25]。

2　结果分析

2.1　生长季 NDVI 时间变化特征

由图 2 可知,近 20 年来长江流域生长季 NDVI 呈现波动上升趋势,其增长速率为 0.0034/a。生长季 NDVI 与年份呈显著相关,相关系数 0.9136 通过了 0.01 的置信度检验,说明在研究时段内长江流域植被覆盖得到有效改善。从年际变化来看,不同阶段呈现出不同的变化特征。基于 M-K 突变检验显示,2009 年前后生长季 NDVI 存在显著差异,经历了 2 个阶段的变化趋势(2000—2009 和 2010—2019 年)。其中 2000—2009 年生长季 NDVI 年际变化速率为 0.0046/a($R^2=0.8283$,$P<0.01$),该时段受长江流域退耕还林工程实施的影响,生态保护工程成效显著,人为作用促进了植被覆盖的稳定增长。2010—2019 年生长季 NDVI 年际变化速率为 0.0033/a($R^2=0.8103$,$P<0.01$),增长幅度有所放缓。其原因为:在全球气候变化的背景下,长江流域受

2009—2010 年极端异常气候的影响,降雨稀少,气温异常,干旱、洪涝、山体滑坡、泥石流与台风等灾害频繁对植被的生长发育影响明显,在一定程度导致该时段内植被覆盖增长趋势放缓。

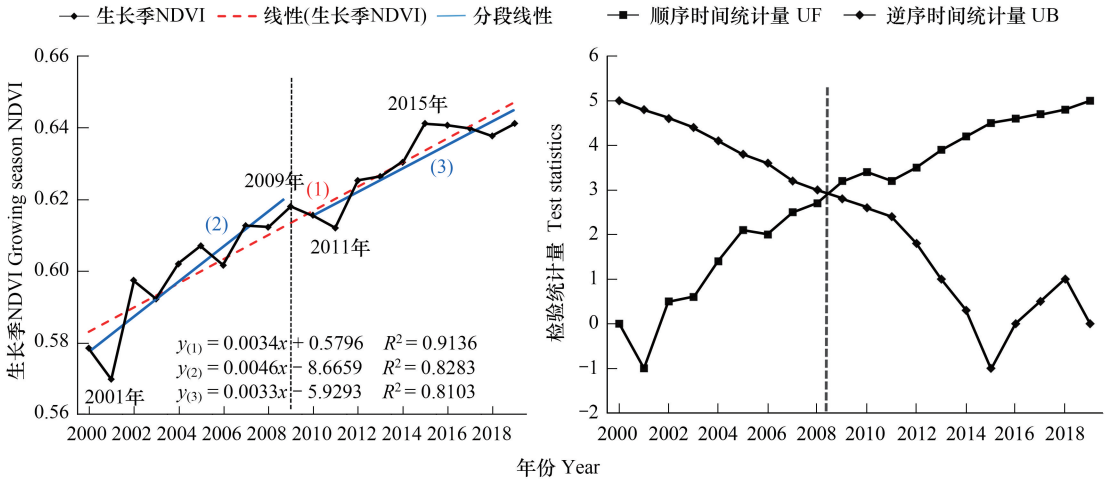

图 2 2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 年际变化与突变检测

Fig.2 Interannual variation and mutation detection of NDVI in the growing season of Yangtze River Basin from 2000 to 2019

2.2 生长季 NDVI 空间差异特征

2.2.1 生长季 NDVI 空间分布特征

图 3 为 2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 空间分布图。由于植被类型、土地利用、气候因素等不同,长江流域生长季 NDVI 大致呈现“中部高、东西低”的空间分布格局,流域上中下游生长季 NDVI 分别为 0.5760、0.6802 和 0.5924。其中,汉水流域西部、嘉陵江流域北部、乌江流域、洞庭湖流域西部和鄱阳湖流域等地区植被覆盖良好。金沙江流域和岷-沱江流域上游生长季 NDVI 则相对较低,其中金沙江流域上游以高寒草原、草甸和高山植被为主,植被生长环境较为脆弱,海拔高、气温低、降水少造成该区域生长季 NDVI 值较低[26];岷-沱江流域上游植被类型多为高山植被,海拔差异和水热不均是导致该区域生长季 NDVI 值较低的主要原因[27]。太湖流域因经济发达和人口较为密集,植被受人为干扰因素较高、植被覆盖情况普遍较差。

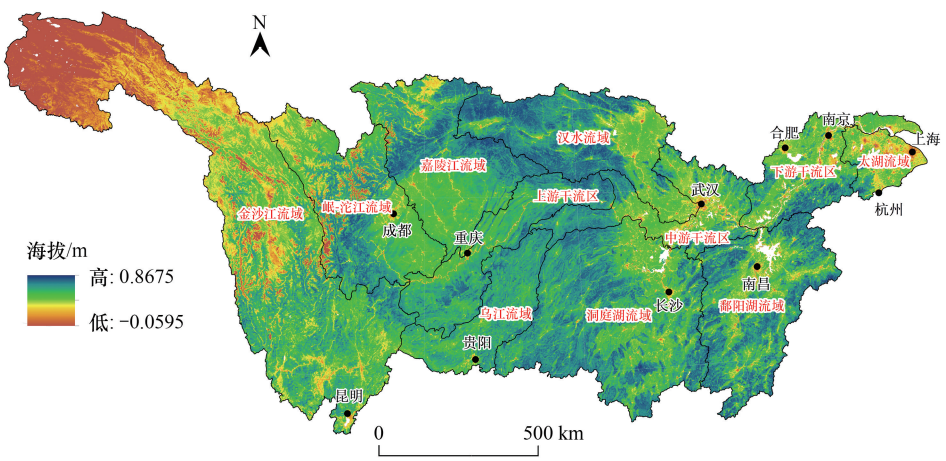

图 3 长江流域生长季 NDVI 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of NDVI in the growing season of Yangtze River Basin

2.2.2　生长季 NDVI 稳定性特征

变异系数能客观反应数据分布的离散性与波动性。2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 变化情况总体比较稳定,变异系数介于 0.0104—1.3199 之间(图略),平均值为 0.0667,反应近 20 年来长江流域生长季 NDVI 整体处于较低波动状态。参照前人研究成果[28],将研究区生长季 NDVI 变异系数划分为 5 个等级(图 4)。由图 4 可以看出长江流域生长季 NDVI 空间波动呈现中间低,东西高,东西局部区域高低波动并存,地域稳定性空间差异明显的分布特征。

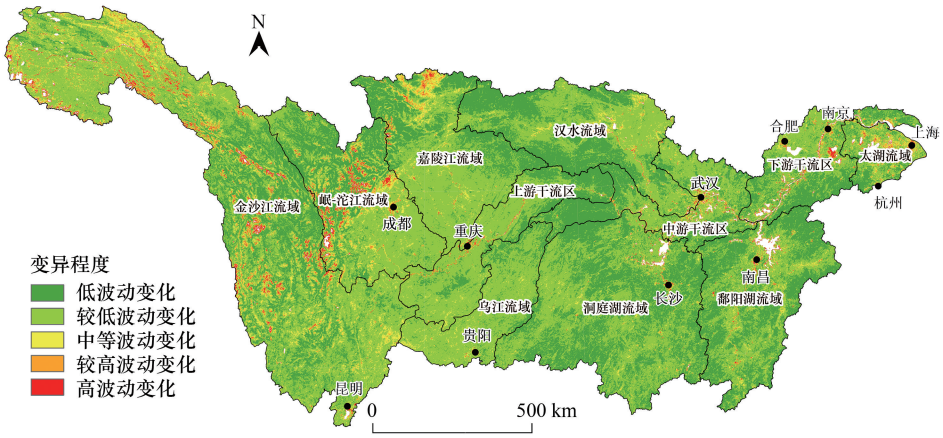

图 4　2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 变化稳定性

Fig.4　Stability of NDVI changes in the growing season of Yangtze River Basin from 2000 to 2019

由图 4 和表 1 可知,长江流域生长季 NDVI 较低波动变化面积的比例最大,为 54.82%,主要分布在长江中部的汉水流域东部平原丘陵区、乌江流域、洞庭湖流域西部、岷-沱江流域和嘉陵江南部和上游干流区;高波动变化面积的比例最小为 1.33%,主要分布在金沙江流域横断山脉地区、岷-沱江流域上游地带的岷山邛崃山高山区、嘉陵江流域北部的若尔盖草原,高波动变化呈零星状散布在该区域的高海拔地区,且远离城市建成区。自然因素是该区域生长季 NDVI 高波动变化的主要原因,如泥石流、极端气候等。此外,太湖流域以及长江干流与支流沿线区域生长季 NDVI 变化剧烈,该区域是人口密集区和传统农耕区,快速的土地覆盖变化导致生长季 NDVI 变化波动大;低波动等级面积比例为 34.73%,集中分布在岷-沱江流域中下游的四川盆地中部丘陵区、长江流域云贵高原中部以及金沙江流域的长江源头区域。该区域植被类型以山地草甸、高寒草甸和原始森林为主,高寒草甸和原始森林受到人类活动干扰较小,生长季 NDVI 波动变化程度最小;中等波动变化面积的比例为 7.30%;而较高波动变化面积的比例为 1.81%,并且伴随着高波动变化出现。综上所述,20 年来长江流域生长季 NDVI 波动程度较低,植被变化相对稳定,植被覆盖度区域增强,大部分区域无显著性变化,改善的面积大于退化的面积。

表 1　2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 变化稳定性

Table 1　Stability of NDVI changes in the growing season of Yangtze River Basin from 2000 to 2019

CV 变化范围 *CV* variation range	变异程度 Degree of variation	百分比 Percentage/%	*CV* 变化范围 *CV* variation range	变异程度 Degree of variation	百分比 Percentage/%
(≤0.05)	低波动变化	34.73	(0.15,0.20]	较高波动变化	1.81
(0.05,0.10]	较低波动变化	54.82	(>0.20)	高波动变化	1.33
(0.10,0.15]	中等波动变化	7.30			

2.3　生长季 NDVI 变化趋势分析

运用 Theil-Sen Median 趋势法分析 2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 年际变化趋势的空间分布特征

(图 5)。显著性检验为生长季 NDVI 通过了极显著($P<0.01$)与显著($P<0.1$)的检验。

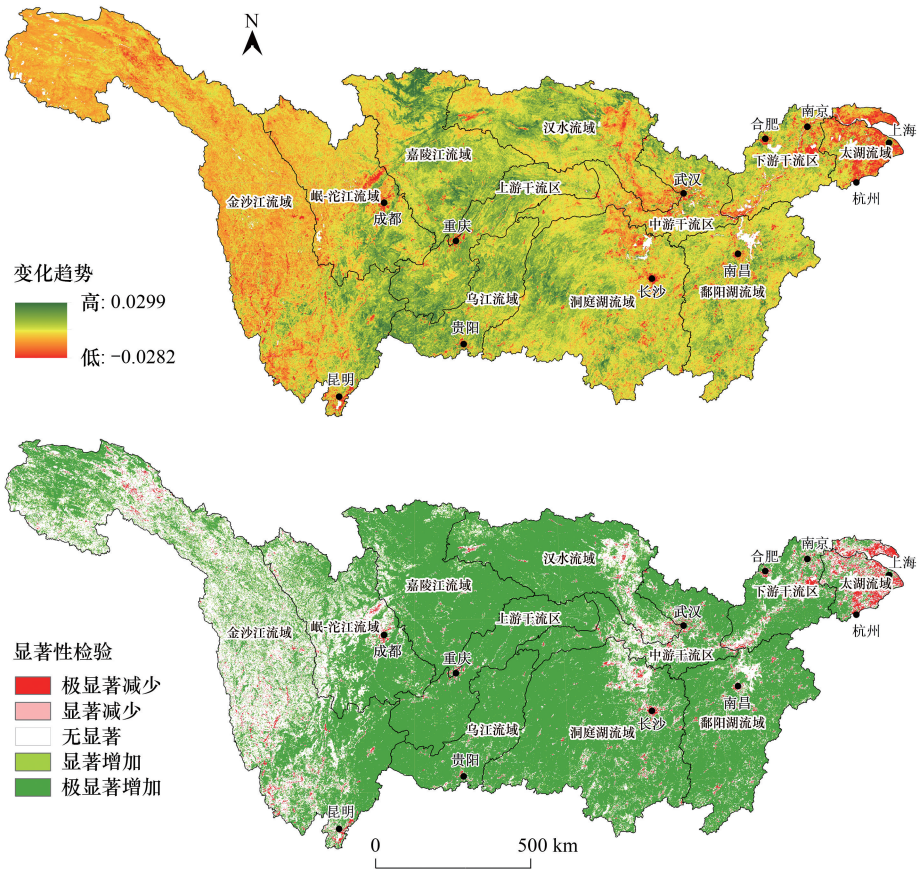

图 5 长江流域生长季 NDVI 变化趋势及显著性检验

Fig.5 Variation trend and significance test of NDVI in the growing season of Yangtze River basin

由图 5 可知,长江流域中部地区生长季 NDVI 情况要明显好于东部和西部地区。90.57%的区域生长季 NDVI 整体呈上升趋势,以长江流域中部区域分布为主,其中 71.30%的区域呈现显著和极显著增加趋势,主要分布于上游干流区、嘉陵江、乌江、洞庭湖、鄱阳湖以及汉水流域。该区域植被覆盖状况的好转得益于国家及地方一系列退耕还林、封山育林、退湖还田等重点生态治理工程的实施。长江流域生长季 NDVI 呈减少趋势的面积占比为 9.43%,其中 2.57%的区域呈现显著和极显著减少的趋势,主要分布在经济发达的长三角地区、省会城市及其地区中心城市,如上海、南京、杭州、武汉、长株潭城市群等周边地区。这些区域人口集聚和经济发展带来的生态环境破坏,以及城市化进程造成城市周边土地覆盖类型的改变,是导致该区域生长季 NDVI 减少的主要原因。总体而言,近 20 年长江流域生长季 NDVI 整体呈显著改善趋势,海拔相对较低、人类活动较为频繁地区的生长季 NDVI 变化斜率较大;高海拔区域由于气候因素,生长季 NDVI 变化主要表现为基本不变(轻度退化或轻度改善);整体上,长江流域生长季 NDVI 变化趋势为:中部强于东部、东部强于西部。

表 2 长江流域生长季 NDVI 变化趋势显著性统计

Table 2 Statistical significance of NDVI variation trend in the growing season of Yangtze River Basin

	极显著减少 Extremely significant reduction	显著减少 Significantly reduced	不显著减少 Insignificantly reduced	不显著增加 Insignificantly increased	显著增加 Significant increase	极显著增加 Extremely significant increase
百分比 Percentage/%	1.08	1.49	7.25	18.88	15.54	55.76

2.4　生长季 NDVI 对气候的响应

气候是影响区域植被分布和生长的重要因素,生长季植被变化与气候的关系尤为密切[29],而气温与降水是影响植被生长状况最关键的气候因素[30]。为客观反映气温、降水对植被生长的影响,本研究采用偏相关分析探讨长江流域生长季 NDVI 与气候因子之间的相互关系。

2.4.1　生长季 NDVI 与气候因子的相关性

由图 6 可知,生长季 NDVI 和降水正负相关性并存,整体上呈现正相关的关系。生长季 NDVI 与降水呈正相关的区域占总面积的 78.29%,其中具有显著(P<0.1)和极显著(P<0.01)正相关的区域分别为 11.15%和 12.32%,主要分布于:上游干流区、乌江流域、嘉陵江流域南部川中盆地、岷-沱江流域南部的四川盆地中部丘陵区、金沙江流域的青南高原区以及下游干流区的九华山-黄山地区;生长季 NDVI 的持续改善显著提升了区域水土保持与涵养水源的作用,区域内地表植被的生长状况受水分条件改良的正影响巨大。长江流域生长季 NDVI 和降水呈负相关的面积占比为 21.71%。其中,通过显著性检验的面积微乎其微,呈负相关的区域主要分布在金沙江流域的横断山脉区、岷-沱江流域南部的四川盆地北部山地区、汉水流域西部的秦巴山地区和太湖流域的长三角地区。可以说,降水对长江流域内的植被空间分布差异有着重要的作用。

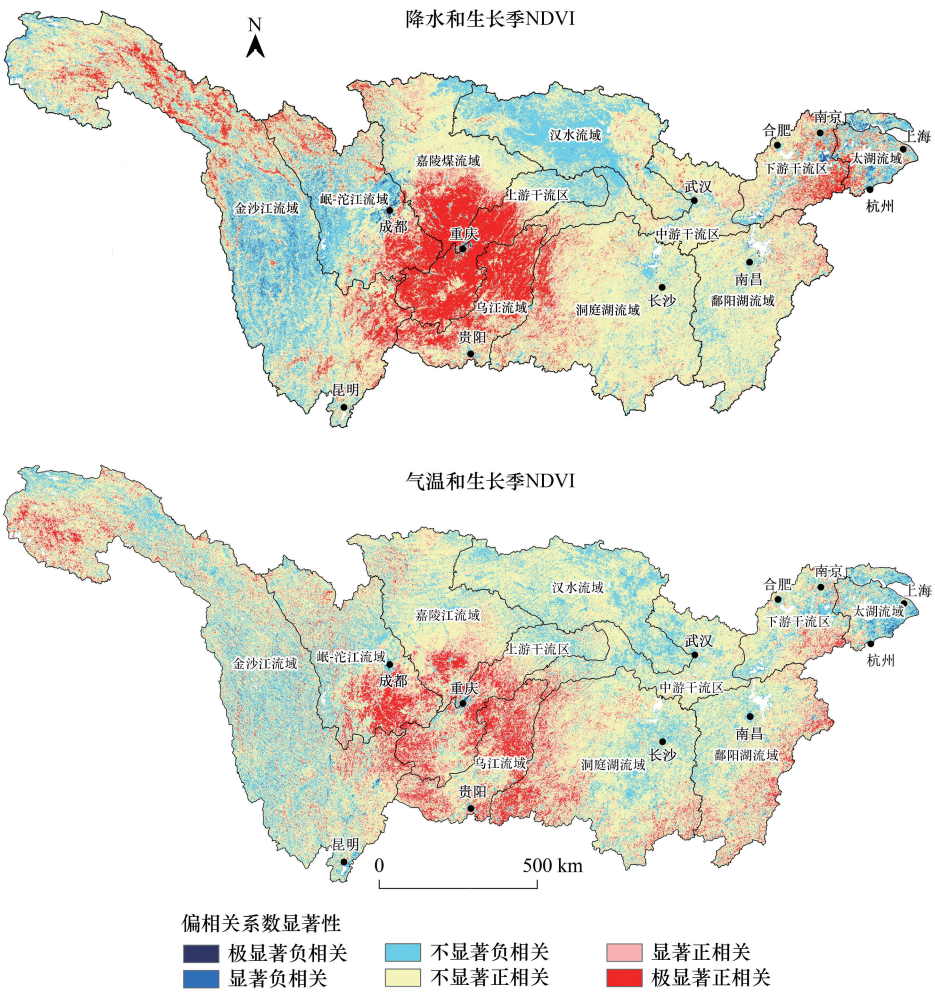

图 6　2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 与降水和气温的显著性检验

Fig.6　Significance test of NDVI and precipitation and temperature in the growing season in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019

气温是影响植被生长的另一关键气候因素。由图 6 可知,生长季 NDVI 与气温呈正相关区域占 80.80%,具有显著(P<0.1)和极显著(P<0.01)正相关分别为 11.59%和 7.30%,主要分布在长江流域中部的四川盆地

和武陵山片区,东部的南岭-武夷山片区和流域西部的金沙江上游的长江源头区域。该区域水资源丰富,植被对降水的依赖相对较小;加之海拔较高,温度升高有利于植被的生长,导致气温成为这一区域植被生长的主要限制因子。生长季 NDVI 与气温呈现负相关面积占比 19.20%,主要表现为不显著负相关,以金沙江流域的横断山脉区、汉水流域东部的江汉平原区和太湖流域的长三角地区分布为主。

表 3 生长季 NDVI 与降水和气温的相关显著性统计/%

Table 3 Statistical significance of correlation between NDVI and precipitation-temperature in the growing season

	极显著负相关 Extremely negative correlation	显著负相关 Significant negative correlation	不显著负相关 No significant negative correlation	不显著正相关 No significant positive correlation	显著正相关 Significant positive correlation	极显著正相关 Extremely significant positive correlation
降水 Precipitation/%	0.29	0.81	20.61	54.82	11.15	12.32
气温 Temperature/%	0.15	0.50	18.56	61.92	11.59	7.30

2.4.2 生长季 NDVI 变化驱动因素

植被覆盖变化受气候变化和人类活动的双重作用,气候变化对植被的生长起着至关重要的作用[31]。参考前人研究[32]分析长江流域生长季 NDVI 变化的驱动因素。如表 4 所示,研究区生长季 NDVI 受气候因素驱动的区域面积占比 91.26%。其中,67.83%的区域受气温和降水共同驱动,主要分布于长江流域的中、东部区域;这些区域冬季湿冷漫长,夏季高温多雨,植被生长喜水喜热。受降水驱动为主的地区呈斑块状集中分布在汉水流域东部、嘉陵江流域和金沙江流域上游部分地区,约占整个研究区面积的 10.46%;其中金沙江流域上游和嘉陵江流域北部属于西北干旱半干旱区的过渡地带,该区域光照资源较为丰富但降水量较少,植被生长对降水的反应较为敏感[26];汉水流域东部的江汉平原地区气温较高光照充足,高温加速了地表的蒸散发过程,水分大量蒸发使得土壤水分流失严重,土壤干化会降低植被光合作用能力[33];气温升高对植被生长具有抑制作用[34],而降水增加则促进了植被生长,造成该区域植被生长对降水的反应较为敏感。

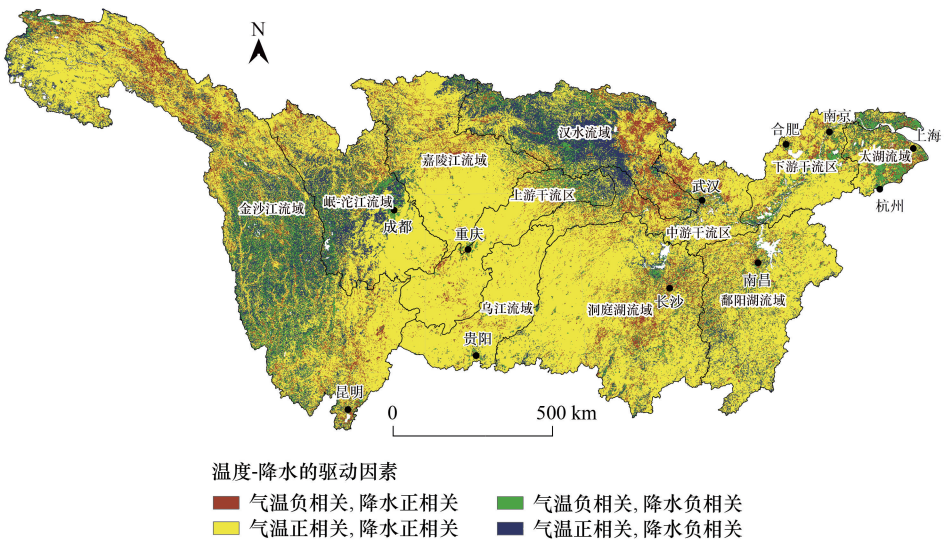

图 7 长江流域生长季 NDVI 与温度-降水的驱动因素分区

Fig.7 Division of driving factors between NDVI and temperature-precipitation in the growing season of Yangtze River Basin

长江流域 12.97%的区域生长季 NDVI 受温度驱动,主要集中在汉水流域西部的秦巴山地区。研究结果表明,不同海拔带植被覆盖变化对气温的响应差异显著;伴随海拔高度的变化,植被覆盖与气温的相关性由负转正[29]。由于该区域属高海拔山地区,是气温变化的敏感区和生境脆弱区;温度随海拔升高而降低,因此热量成为该区域植被生长的主要限制性因子,这与陈超男[35]和崔晓临[36]研究结果一致。此外,岷-沱江流域的

川西高原地区也呈正相关,该地区植被类型普遍为森林及高山灌丛草地,区内降水量相对较多,植物生长所需水分充足,受降水的影响较小,高海拔区域的植被生长对温度变化更为敏感[21]。

表 4　长江流域生长季 NDVI 对气温和降水的综合响应

Table 4　Comprehensive response of NDVI to temperature and precipitation in the growing season of Yangtze River Basin

分区 Partition	气温 Temperature	降水 Precipitation	百分比 Percentage/%	分区 Partition	气温 Temperature	降水 Precipitation	百分比 Percentage/%
分区一 Partition one	-	+	10.46	分区三 Partition three	-	-	8.74
分区二 Partition two	+	+	67.83	分区四 Partition four	+	-	12.97

流域内 8.74%的区域不受气候因素驱动,主要分布在太湖流域。该区域经济发达,人口密集,快速的城市化进程导致人口的大量流入,建设用地需求的增加导致占用大量林地和农田,植被覆盖减少受人为干扰较大。金沙江流域横断山区和岷-沱江流域西部的岷山邛崃山高山区等高海拔区域,其植被生长同样与气温、降水均呈负相关。一是在地势起伏度和坡度较大的地区更容易发生植被退化现象[37];而这些区域均是地势起伏度较大的严重退化区,地势复杂,植被类型相对单一,生态环境承载力较差。二是可能由于该区域降水较多,但降水的增加使气温降低、光照强度下降、光合作用减弱,在降水和气温的共同作用下使植被的生长受到一定抑制[38]。金沙江流域既是长江上游生态脆弱区和自然灾害频发区,也是长江流域生态建设工程的重点实施区,该区域植被变化受自然和人为因素的交互影响。从整体上看,长江流域生长季 NDVI 变化表现为气候因素驱动,局部区域表现受自然因素叠加人为因素作用共同驱动。

2.5 人类活动对生长季 NDVI 变化的影响

残差分析法可分离出人类活动对植被覆盖变化的贡献,能有效反应人类活动对植被覆盖的影响[39]。如图 8 所示,流域残差变化正面效应区域远大于负面效应区域,近 20 年间生长季 NDVI 残差总体呈上升趋势,流域植被覆盖快速增长。这些区域植被覆盖除受气候因素影响外,自 2001 年以来实施的长江中上游防护林体系建设、生态退耕、山区和湖区植树造林等生态建设工程积极促进了流域植被覆盖变化,人类活动正影响效应明显。

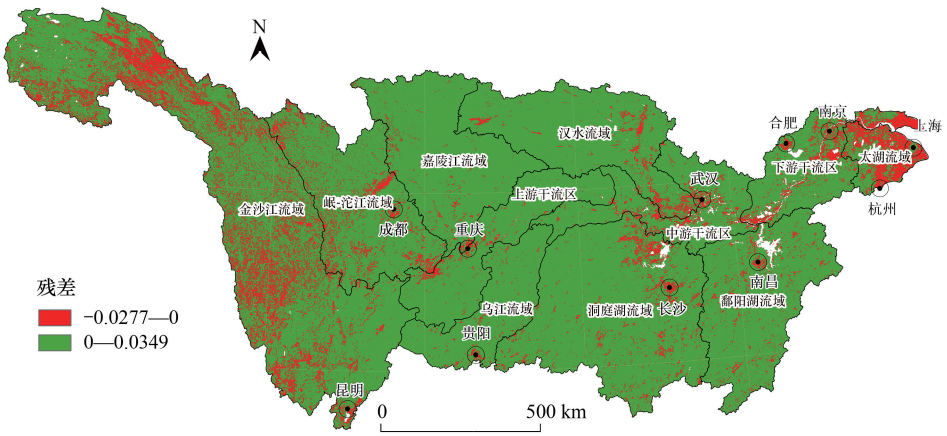

图 8　2000—2019 年长江流域生长季 NDVI 残差变化趋势

Fig.8　Residual trend of the growing season NDVI in Yangtze River Basin from 2000 to 2019

残差为负的区域为人类活动对植被覆盖产生破坏作用的区域,面积占研究区总面积的 12.27%,其中金沙江上游大规模的水电开发和生态保育工程措施的实施整体改善了植被覆盖状况,但流域脆弱的生态环境也引发人类活动对植被覆盖变化的反效应[40]。长三角地区和长江沿线的武汉城市圈、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群、皖南城市带和成渝经济区等城市发展密集区也是残差为负的重点区域。这些区域既是社会经济与人类

活动密集区又是主要的粮食生产区,人类活动对植被覆盖具有一定的破坏作用,特别是城市周边大量的农林用地被转变为建设用地以满足城市发展需求,导致城镇周边区域 NDVI 的显著减少。

表 5 2000—2018 年长江流域残差正负效应区域土地利用变化转移矩阵/km²

Table 5 The transition matrix of land use change in the regions with positive and negative effects of residuals in the Yangtze River Basin from 2000 to 2018

2000	2018(残差为负 Residuals are negative)							2018(残差为正 Residuals are positive)						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	合计	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	合计
耕地 Cropland	0	154.7	89.05	528.33	6953.4	15.08	7740.55	0	19792.73	7715.86	3952.8	9468.06	108.14	41037.58
林地 Forest	157.39	0	462.81	31.71	310.48	73.06	1035.45	17549.23	0	13609.27	1386.46	2299.3	284.32	35128.58
草地 Grassland	122.19	963.16	0	62	90.84	377.49	1615.67	8853.46	24136.73	0	805.2	681.15	2290.62	36767.16
水域 Water	171.11	10.94	46.85	0	187.95	15.54	432.39	1926.45	568.19	336.5	0	391.51	322.34	3544.99
建设用地 Settlement	421.68	8.78	6.24	28.5	0	1.18	466.38	2445.98	320.12	130.91	185.9	0	8.95	3091.86
未利用土地 Unwsed	0.65	84.4	3971.25	112.94	3.09	0	4172.33	58.68	458.3	7944.55	468.41	15.76	0	8945.7
合计 Total	873.01	1221.97	4576.2	763.49	7545.76	482.34	15462.77	30833.79	45276.07	29737.1	6798.76	12855.78	3014.37	128515.87

土地利用变化对植被变化的影响具有明显的正负效应。一方面,流域内的城市开发建设破坏地表植覆盖;另一方面,新增的林地和耕地明显改善了植被的覆盖状况[41]。由表 5 可知,2000—2018 年间长江流域发生土地类型变化的面积约 143978.64km²。其中,耕地转出面积最多,累计转出约 48778.13km²,主要转为林地(40.89%)和建设用地(33.67%);林地转入面积最多,累计转入约 46498.04km²,主要由草地(贡献率 53.98%)和耕地(贡献率 42.90%)转化而来。残差变化为负的区域土地利用转移类型主要为耕地转为建设用地和未利用地转草地,面积分别为 6953.4km²和 3971.25km²。流域内残差变化为正的区域中有 19792.73km²耕地转为林地、17549.23km²林地转为耕地、13609.27km²林地转草地、24136.73km²草地转为林地;此外人类活动加剧导致植被退化,主要分布在流域各大城市群(图 9),耕地和林地是建设用地的主要来源,占建设用地流入面积的比例分别为 73.65%和 17.89%。大规模的城镇化导致农用地转为建设用地破坏了城市周边地表植被,从而显著降低了植被覆盖度。可见,流域生态工程和城市化是长江流域植被变化的主导人为因素。

3 结论与讨论

3.1 讨论

长江流域植被覆盖变化是气候和人为等多种因素共同作用的结果。研究结果表明,近 20 年来长江流域生长季 NDVI 呈增长趋势,与气候因子的偏相关分析存在正负并存的现象,区内植被受温度的影响强于降水,人类活动主要表现为土地利用变化,且对植被的影响具有空间差异性。本文基于像元尺度探究了长江流域植被的时间变化特征、趋势特征、稳定性特征以及气候变化和人类活动对植被覆盖变化的影响,研究结果对长江流域生态保护具有参考意义。但仍存在以下不足之处:

首先,生长季 NDVI 时空演变不仅受气温和降水的影响,同时也受日照、湿度等多种其他气候因素驱动[42]。植被覆盖与气象要素间存在复杂的非线性关系,本文仅考虑气温与降水两大关键气候因素构建模型来分析地表植被覆盖变化,未将日照时数、土壤湿度与蒸发量等其他气候因素纳入考量,可能会导致研究结论具有一定的偏差,应在今后的深入研究中选择多种气候因素予以全面考量。

其次,由于长江流域不同区域间地形、地貌、气温、降水等方面差异显著,可能导致研究区内不同区域的地表植被生长状况对气候因素的响应存在空间差异,进而造成相关数据具有差异的同向滞后性[39]。因此,本研究基于 NDVI 与相关气候数据所获得的研究区植被变化趋势,可能与现实情况存在一定的误差,需要大量的实地考察验证以避免该类情况的发生。然而,相关数据的实地考察验证具有相当大的现实困难,未来后续研究应着重考量植被与非植被的区域性阈值确定和气象因子对不同区域植被影响的滞后性。

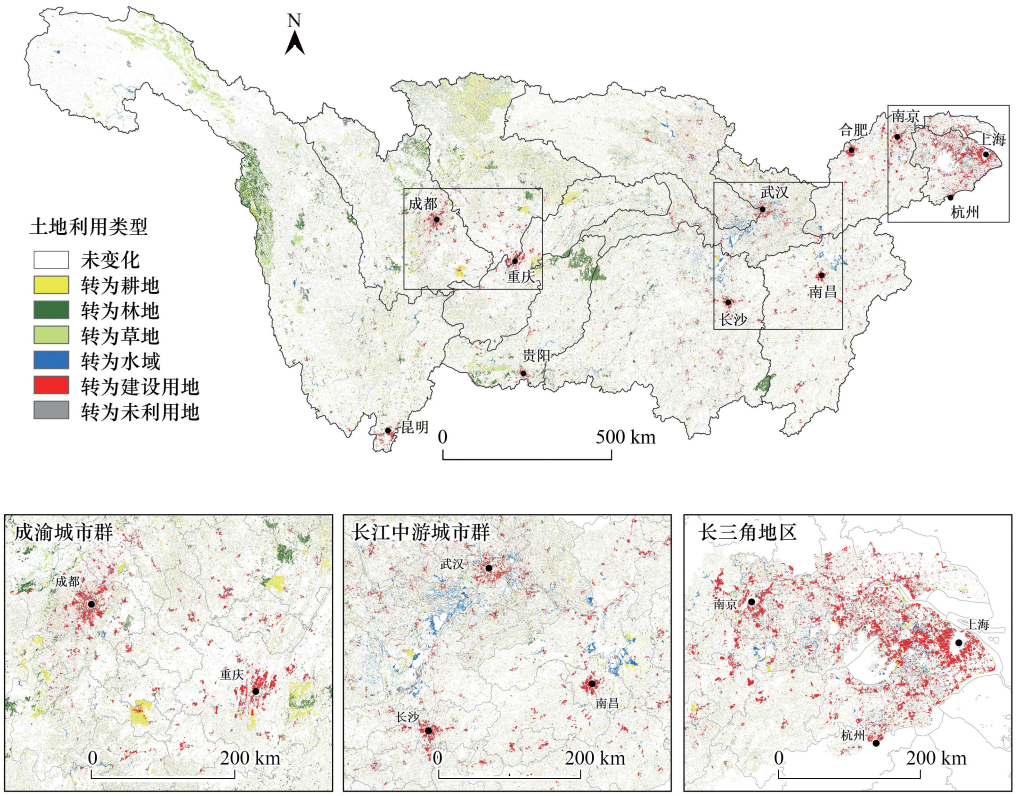

图 9　2000—2018 年长江流域土地利用类型变化的空间分布

Fig.9　Spatial distribution of land use type change in Yangtze River Basin from 2000 to 2018

再者,随着长江流域确定“共抓大保护,不搞大开发” 的生态战略,流域内大规模、大范围实施的退耕还林还湖、水土保持等生态保护建设工程使得生态效益逐渐凸显。有研究表明,中国植被覆盖的增加受气候变化与人类活动共同驱动[43]。可见,除气候变化因素外,人类活动以及国家生态政策对长江流域植被覆盖变化产生重大影响。本研究仅探究了人类活动对植被覆盖变化的的正负效应,后续研究应叠加人类活动的干扰效应,结合社会、经济等相关数据,全面审视人类活动的正负效应并量化其贡献度,从而全面考量人为因素对研究区域生态环境的影响程度,深化气候变化与人类活动对植被覆盖变化的定量分析。

3.2　结论

(1)时间变化上,长江流域生长季 NDVI 呈现波动增长趋势,显著改善面积大于退化面积;增长趋势在 2009 年存在一个突变,表现为 2009 年后长江流域植被覆盖增长趋势放缓。

(2)空间分布上,生长季 NDVI 的多年均值为 0.6164,植被覆盖程度呈较高覆盖状态。在空间分布上具有明显的规律变化特征,大致呈现出“中部高,东西低”的空间分布格局。

(3)变化趋势上,2000—2019 年长江流域植被覆盖增加区域大于减少区域,在空间上表现为中部强于东部、东部强于西部。

(4)变化稳定性上,长江流域生长季 NDVI 变异系数介于 0.0104—1.3199 之间,空间分布表现为:中间低,东西高,东西部局部区域高低波动并存,地域性差异明显的空间变化稳定性特征。

(5)影响因素上,长江流域植被覆盖变化受气温和降水共同影响,生长季 NDVI 与气温和降水量以正相关为主。从整体上看,长江流域大部分区域的生长季 NDVI 变化表现为气候因素驱动为主,局部区域表现为自然因素叠加人为因素作用的共同驱动。残差分析显示人类活动对植被覆盖变化的影响具有正负效应,整体上人类活动对长江流域植被覆盖以正效应为主。

参考文献(References):

[1] Cui L L, Shi J. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2): 163-176.

[2] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.

[3] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.

[4] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. Nature, 2016, 531(7593): 229-232.

[5] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 70-80.

[6] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.

[7] 杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, Ghebrezgabher M G, 王倩, 魏怀东. 气候变暖背景下近 30a 北半球植被变化研究综述. 干旱区研究, 2016, 33(2): 379-391.

[8] Levine J M. A trail map for trait-based studies. Nature, 2016, 529(7585): 163-164.

[9] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.

[10] Mahlstein I, Daniel J S, Solomon S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature. Nature Climate Change, 2013, 3(8): 739-743.

[11] 刘海, 黄跃飞, 郑粮. 气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响. 农业工程学报, 2020, 36(6): 97-105.

[12] 王春雅, 王金牛, 崔霞, 魏彦强, 孙建, Naudiyal N, 杜文涛, 陈庆涛. 藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析. 地理研究, 2021, 40(11): 3191-3207.

[13] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 李成, 罗晓琦, 冯浩. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4804-4811.

[14] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 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. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.

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

[16] 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.

[17] Qu S, Wang L C, Lin A W, Zhu H J, Yuan M X. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: climate change or anthropogenic factors? Ecological Indicators, 2018, 90: 438-450.

[18] Chen S S, Wen Z F, Zhang S L, Huang P, Ma M H, Zhou X, Liao T, Wu S J. Effects of long-term and large-scale ecology projects on forest dynamics in Yangtze River Basin, China. Forest Ecology and Management, 2021, 496: 119463.

[19] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2084-2097.

[20] 杨少康, 刘冀, 魏榕, 董晓华, 林青霞, 章程焱. 长江上游流域生长季植被覆盖度时空变化特征及其成因. 长江流域资源与环境. [2022-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20211025.1036.002.html.

[21] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越. 长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 66-78.

[22] Zhang R P, Liang T G, Guo J, Xie H J, Feng Q S, Aimaiti Y. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2888.

[23] Kalisa W, Igbawua T, Henchiri M, Ali S, Zhang S, Bai Y, Zhang J H. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16865.

[24] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, Pan Y Z, Liu Y X, Zhang D H, Lin Z H. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 288-302.

[25] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.

[26] 张顾萍, 陈国民, 邵怀勇, 仙巍. 近 16 年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1638-1648.

[27] 张甜甜. 西南三江流域植被 NDVI 时空特征及其对气候变化与人类活动的双重响应[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.

[28] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.

[29] 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. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2665-2678.

[30] Liu Q, Yang Z P, Han F, Wang Z G, Wang G R. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: a case study in the Tianshan Mountains, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1189.

[31] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.

[32] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 闾利, 郑飞鸽. 红河流域"通道-阻隔"作用下 2000-2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力. 生态学报, 2018, 38(6): 2056-2064.

[33] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.

[34] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601-1609.

[35] 陈超男, 朱连奇, 田莉, 李新鸽. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. 生态学报, 2019, 39(9): 3257-3266.

[36] 崔晓临, 白红英, 王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应. 资源科学, 2013, 35(3): 618-626.

[37] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究. 生态学报, 2021, 41(03): 1158-1167.

[38] 吕华丽. 长江流域植被覆盖变化及其驱动力因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.

[39] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.

[40] 刘婷婷. 金沙江上游流域生态承载力及人与生态系统关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

[41] 孙颖, 易浪, 尹少华. 洞庭湖流域植被覆盖变化及其协同治理. 经济地理. [2022-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1126.K.20220310.0913.004.html.

[42] 袁喆, 喻志强, 冯兆洋, 许继军, 尹军, 鄢波, 雷恒. 长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应. 长江科学院院报, 2019, 36(11): 7-15.

[43] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.