柯浩成,袁春慧,王茂林,等.中国主要流域植被动态演变及其突变方法适宜性评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6262-6274.
Ke H C, Yuan C H, Wang M L, et al. Dynamic evolution of vegetation in major watersheds in China and suitability assessment of its mutation method [J]. China Envirenmental science, 2025,45(11):6262-6274.

中国主要流域植被动态演变及其突变方法适宜性评估

柯浩成[1*],袁春慧[1],王茂林[1],马晓燕[1],王 飞[1],杨 陈[1],李占斌[2],李 鹏[2] (1.兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050；2.西安理工大学,西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要：基于长序列归一化植被指数(NDVI)数据,运用 Theil-Sen Media 趋势分析+Mann-Kendall 检验、时间稳定性、有序聚类法、滑动 T 检验多种突变方法,研究了 2000~2022 年中国主要流域植被 NDVI 的动态变化特征和时间稳定性,并识别中国主要流域的代表性子流域.研究结果表明:时间上,中国主要流域植被 NDVI 值均呈显著上升趋势,其中,黄河流域增长速率最高,为 0.0052a^{-1},松辽河流域次之,为 0.0032a^{-1},淮河流域最小,增长速率仅为 0.0010a^{-1}.空间上,植被NDVI 呈现出由东南到西北递减的趋势特征,植被变化以改善为主,占比为 52.02%,且各等级植被覆盖间的流动以流向更高等级为主.中国主要流域植被稳定性的代表性子流域分别为:西南诸河流域(35# 澜沧江流域)、内陆河流域(15# 塔里木河流域)、长江流域(8# 汉江流域)、东南诸河流域(24# 闽江流域)、淮河流域(16# 沂河流域)、海河流域(32# 大清河流域)、松辽河流域(21# 松花江流域)、珠江流域(12# 西江流域)、黄河流域(7# 汾河流域).综合不同流域突变方法,得出有序聚类法和滑动 *T* 检验法更适用于大部分流域植被变化突变检测,其中东南诸河流域 Pettitt 检验法适宜,海河、内陆河、珠江、长江流域适宜有序聚类法,松辽河、淮河、西南诸河流域适宜有序聚类法和滑动 *T* 检验法,黄河流域适宜滑动 *T* 检验法.

关键词：植被动态变化；时间稳定性；突变方法适宜性；代表性子流域；中国主要流域
中图分类号：X171 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6262-11

Dynamic evolution of vegetation in major watersheds in China and suitability assessment of its mutation method. KE Hao-cheng[1*], YUAN Chun-hui[1], WANG Mao-lin[1], MA Xiao-yan[1], WANG Fei[1], YANG Chen[1], LI Zhan-bin[2], LI Peng[2] (1.College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China；2.State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). *China Envirenmental science*, 2025,45(11)：6262~6274

Abstract：Based on the long-series normalized vegetation index (NDVI) and climate, topographic and human activity factor data, this study studied the dynamic change characteristics and temporal stability of vegetation NDVI in China's first-class watersheds from 2000~2022 by using Theil-Sen Media trend analysis+Mann-Kendall test, geographic detector and temporal stability, and identified the representative sub-watersheds of nine first-class watersheds in China. The findings indicated that: in terms of time, the NDVI values of vegetation in the nine major river basins of China showed a significant upward trend. Among them, the Yellow River Basin had the highest growth rate of 0.0052a^{-1}, followed by the Songliao River Basin with a growth rate of 0.0032a^{-1}, while the Huaihe River Basin had the lowest growth rate, at only 0.0010a^{-1}. Spatially, the NDVI of vegetation exhibited a declining trend from the southeast to the northwest, and the vegetation change was mainly improved, accounting for 52.02%, and the flow between different levels of vegetation cover was mainly to the higher grades. The representative sub-basins of vegetation stability in the major river basins of China are as follows: Southwest River Basins (No. 35 Lancang River Basin), Inland River Basins (No. 15 Tarim River Basin), Yangtze River Basin (No. 8 Han River Basin), Southeast River Basins (No. 24 Min River Basin), Huai River Basin (No. 16 Yi River Basin), Hai River Basin (No. 32 Daqing River Basin), Songliao River Basin (No. 21 Songhua River Basin), Pearl River Basin (No. 12 Xijiang River Basin), and Yellow River Basin (No. 7 Fen River Basin). Based on the mutation methods of different river basins, it was concluded that the ordered clustering method and the sliding *T*-test were more suitable for the detection of vegetation change mutations in most of the river basins, among which the Pettt test was suitable for the southeast river basins, the Haihe River, inland rivers, Songliao River and Yangtze River basins, the Huaihe River and Southwest river basins were suitable for the ordered clustering method and the sliding *T*-test method, and the Yellow River basin was suitable for the sliding *T*-test.

Key words：vegetation dynamic changes；temporal stability；suitability of mutation methods；representative sub-basins；China's first-class river basin

收稿日期：2025-03-01
基金项目：甘肃省科技计划资助项目(25JRRA096);甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA165,23YF7FA0062)
* 责任作者，副教授, kehc@lut.edu.cn

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在碳、水和能源循环中发挥着关键作用,其动态变化对区域生态系统的平衡起到重要的作用[1-2].随着全球环境变化的加剧,植被变化对气候和人类活动的响应已经成为全球变化研究中的热点问题[3-6].归一化植被指数(NDVI)是公认表征植被变化的有效参数之一,是生态平衡的调节器和生态变化的指示器[7-8].植被变化受多种环境因素的影响,自然因子和人为活动影响了陆地生态系统植被覆盖分布情况[9-10].因此,植被变化通常被用来评估陆地生态系统的变化[11-12],通过监测和分析 NDVI 的变化,能够了解植被生长的动态过程[13-15],但由于土地利用方式、经济发展水平以及气候条件的变化,导致 NDVI 的空间分布存在明显差异,且空间遥感技术虽然可以获取区域平均 NDVI 值,但监测尺度小成本高、时间分辨率低[16-18].因此,如何快速准确获取区域植被数据对开展相关研究至关重要.

植被覆盖空间分辨率低,难以精确反映局部情况,监测频率(时间分辨率)低,精确监测区域植被变化难度大,且受环境因素影响大,大范围长时序数据分析耗时长、成本高.时间稳定性研究可通过选代表性点位降低植被监测难度,因此,探究植被动态变化的时间稳定性、识别代表性流域对区域生态安全和可持续发展至关重要[19-20].Vachaud[21]提出了 TSA (Temporal Stability Analysis)即时间稳定性概念,最初用于土壤水分的监测,即如何快速地获取一个区域的平均土壤水分状况.时间稳定性分析是量化点尺度植被动态、确定区域平均植被覆盖代表性位置的有力定量方法,其可靠性已在多区域得到验证.该方法能快速识别代表性位置,节省大区域监测成本与时间,为优化监测位置提供科学依据[22].如刘源等[23]研究了寒山区坡面土壤水分时空变异规律及稳定性特征.梁朝文等[24]揭示了荒漠区人工林土壤水分稳定性,为优化监测提供依据.Zhou 等[25]通过时间稳定性分析为土壤水分监测点布局提供了理论支撑.在区域植被动态变化的监测中,相对某一时期,与植被空间格局密切相关的气候、地形地貌、土壤性质等因素相对稳定,满足时间稳定性研究的条件,故通过时间稳定性选出中国主要流域的代表性子流域[26].现有研究缺乏对特定位置植被能否代表区域平均水平的定量分析,多集中于整体动态探讨.

在区域植被覆盖变化研究中,模型模拟存在明显局限性.生态水文模型难以准确量化大流域尺度人类活动的影响,且在不同地理和气候条件下的适用性受限.此外,模型对现实复杂性的表征能力不足,制约了植被动态预测的可靠性[27].现有研究对植被覆盖在流域尺度上显著的空间异质性关注不足,需进一步揭示其区域差异及驱动机制[28].气候与人类活动对植被的驱动机制复杂,且其影响随地域和时空尺度不同而呈现差异[29-31].代表性流域往往在大流域内具有典型的气候、地形、土壤等自然条件,以及相似的人类活动影响,其植被覆盖数据能够较好地反映整个大流域的植被覆盖特征和变化趋势,为研究提供更具代表性和可靠性的数据基础.本文基于长序列多元数据,分析中国主要流域植被动态变化特征与时间稳定性,识别代表性流域及适用突变方法.通过时间稳定性分析筛选代表性子流域,可减少大流域环境差异带来的偏差,提升研究准确性,为流域生态保护提供科学依据[32].

1　材料与方法

1.1　研究区概况

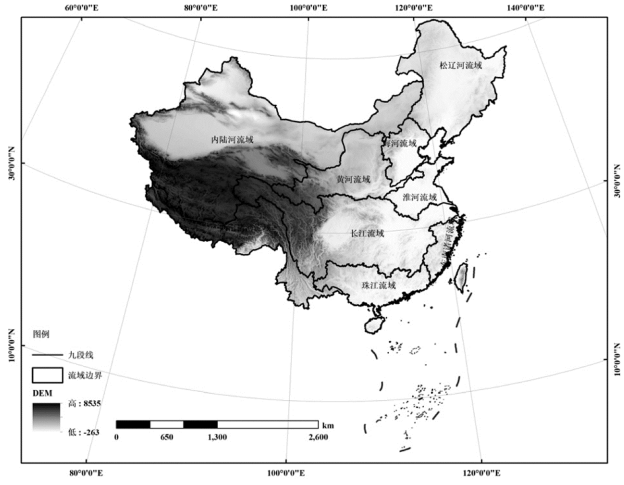


图 1　研究区地理位置

Fig.1　Geographic location map of the study area

审图号:GS(2024)0650 号,底图无修改,下同

中国位于(3°51'~53°33'N,135°2'~73°40'E)亚洲东部,东临太平洋,南接印度洋,西部和北部则与中亚、蒙古接壤.中国地形复杂多样,包括平原、丘陵、高原和山脉等多种地貌特征,中国的平均海拔约为1840m.中国拥有丰富的水系网络,包括众多的江河、

湖泊和水库.中国境内主要的河流包括长江、黄河、珠江等.中国东部沿海地区和南部地区多雨,年降水量可达 1000~2000mm 以上,而西部和北部内陆地区则干旱少雨,年降水量普遍低于 500mm.中国的气温也相对复杂,东部沿海地区年平均气温为 15℃左右;西南地区和西北地区的年平均气温则在 5℃以下.中国的植被覆盖也有明显的地域差异,西部地区为荒漠、戈壁荒原和亚热带季节性落叶阔叶林,东部沿海地区为亚热带常绿阔叶林和温带针叶林.本文将中国划分为九大主要流域,如图 1 所示,划分标准依照资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/).

1.2 植被 NDVI 空间分布及分类

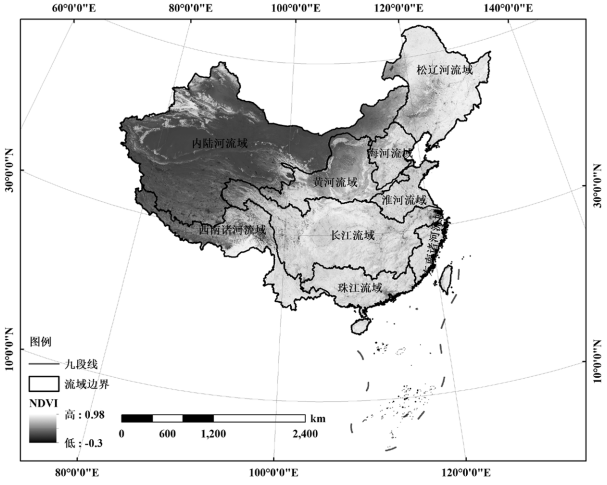


图 2 植被 NDVI 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of NDVI in vegetation

2000~2022 年中国主要流域 NDVI 的空间分布呈现由东南到西北递减的趋势特征,其中,NDVI 高值区分布在长江流域和松辽河流域,NDVI 低值区分布在黄河流域及内陆河流域(图 2).低植被覆盖区(NDVI<0.2)群落结构简单,植被覆盖度极低,缺乏层次结构,生态系统脆弱,通常分布在干旱、半干旱地区,水分不足,气候条件极端.中低植被覆盖区(0.2<NDVI<0.4)植物种类相对丰富,在保持水土、调节气候等方面具有一定作用,通常分布在半干旱或半湿润地区,水分供应相对充足但不稳定.中高植被覆盖区(0.4<NDVI<0.6)群落结构较完整,植物种类丰富,具有一定的层次结构,可能包括乔木层、灌木层和草本层.生态功能较强,在水源涵养、土壤保持、气候调节等方面具有重要作用.通常分布在湿润或半湿润地区,土壤肥沃,水分供应充足,气候条件适宜.高植被覆盖区(NDVI>0.6)群落结构复杂,层次结构明显,各层之间相互交织,形成了复杂的空间结构.生态功能完善,在水源涵养、土壤保持、气候调节等方面具有重要功能,在维护生态平衡和可持续发展具有关键作用,通常分布在湿润地区,气候条件稳定.植被覆盖度分级有助于揭示生态规律、评估系统健康、理解植被与环境的相互作用,同时能指导生态保护修复、优化土地利用、提高农牧业效率、监测预警生态风险,对促进生态系统可持续发展意义重大.

1.3 数据来源与处理

研究所需资料主要包括:2000~2022 年 MODIS-NDVI 数据,该数据来源于资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d.数字高程模型(DEM),来源于国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn).中国 2000~2020 年土地利用类型来源于资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/).数据分析处理在 ArcGIS10.2 和 SPSS16.0 软件中完成.

1.4 研究方法

1.4.1 Theil-Sen Median+Mann-Kendall 趋势分析 将 Theil-Sen Median 斜率分析估计与 Mann-Kendall 参数检验相结合,该方法抗噪性强且能够规避异常值干扰[33].Sen 趋势分析公式为:

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

式中:β 为变化趋势度;median 为中值函数;x_i、x_j 为时间序列第 i、j 的 NDVI 值.其中,β>0 呈上升趋势,β<0 呈下降趋势.

本文取 α=0.05 为显著性水平数值,即当|Z|>1.96 时,代表通过置信度为 95%的显著性检验[34].将 Sen 趋势和 MK 检验结果叠加分析,将检验趋势显著性分为 5 类分别为:显著改善、不显著改善、基本不变、不显著退化和显著退化.

1.4.2 时间稳定性 时间稳定性的评估一般有两种方法:Spearman 秩相关系数法和相对偏差法.

(1)Spearman 秩相关系数法.该法属于非参数检验方法,主要反映测量样点的空间模式在时间上的相似性,分析秩随时间变化的稳定[35-36].

$$\rho = 1 - 6\sum_{i=1}^{N}\frac{(R_{ij} - R_{ik})^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

式中:ρ为秩相关系数;R_{ij}和R_{ik}分别为第j和第k年;第i个NDVI的秩;N是流域个数.ρ值越接近1时间稳定性越好,越接近于0时间稳定性越差.

(2)相对偏差法.它是子流域i(i=1,…,9)在时间j(j=1,…,20)的NDVI值与时间j上所有子流域的NDVI均值的差:

$$\delta_{ij}=\frac{\mathrm{NDVI}_{ij}-\overline{\mathrm{NDVI}_j}}{\overline{\mathrm{NDVI}_j}} \tag{3}$$

判断时间稳定性的两个指标为:平均相对偏差(MRD)和相对偏差的标准差(SDRD),计算公式如下:

$$\overline{\delta}_j=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$\sigma(\overline{\delta}_j)=\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}(\delta_{ij}-\overline{\delta}_j)^2} \tag{5}$$

式中:m为监测时间;N是流域个数;$\overline{\delta}_j$是平均相对偏差;$\sigma(\overline{\delta}_i)$是相对偏差的标准差.MRD反映了子流域植被覆盖与流域平均植被覆盖之间的相对关系;当MRD>0时,表示子流域的植被覆盖高于流域平均值;当MRD<0时,表示子流域低于流域平均值;当MRD=0时,表示子流域等于流域平均值.SDRD反映了植被覆盖在时间上的稳定程度,其值越小说明该子流域植被覆盖的时间稳定性越强.当同时满足MRD接近于零和SDRD较小时,该子流域就可以作为研究区的时间稳定性代表子流域[37].其中,取最接近于0的MRD的±|MRD|×5%反映MRD=0的情况,而其中SDRD最小的子流域作为时间稳定性代表子流域.

1.4.3　突变点检验方法

① Pettitt检验法是利用要素(y)秩序列(x)计算出统计量S_k,其绝对值最大处对应时间点为可能的突变点.

$$x_i=\mathrm{sgn}(y_i-y_j)\quad j=1,2,3,\ldots,I \tag{6}$$

$$S_k=2\sum_{i=1}^{k}x_i-k(n+1) \tag{7}$$

②有序聚类法推估突变点的实质是寻求最优分割点.

③ Man-Kendall法:通过计算统计量Z值,判断流域在时间序列中是否具有显著变化趋势,通过观察正序统计量UF和逆序统计量UB的交点,识别其突变点.

④滑动T检验法通过对比两组数据的平均值差异是否显著来判断是否有突变发生.公式如下:

$$S=\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2+(n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}} \tag{8}$$

$$t=\frac{\overline{x_2}-\overline{x_1}}{\sqrt{s\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}}} \tag{9}$$

⑤累积距平法是计算各时间点相对多年平均数值的距平(R),将其累加(LP)绘制累积距平曲线(式(10)).式中,R_i为i时刻值,$\overline{R}$为平均值,LP_i为i时刻的累计距平.

$$\mathrm{LP}_i=\sum_{i=1}^{n}(R_i-\overline{R}) \tag{10}$$

⑥曼-惠特尼-皮特MWP检验法是基于时间序列的连续数据变化特征进行多变点检测的方法.计算式如下:

$$K_T=\max_{1\leqslant t\leqslant T}|U_t| \tag{11}$$

然后再求最大值|Ut|的发生机率,即

$$P=1-\mathrm{e}^{\frac{-6K_T^2}{T^3+T^2}} \tag{12}$$

式中:T为时间序列;t为假设最可能的显著变化点;P值越接近于1时,则变异愈明显.

2　结果与分析

2.1　植被NDVI时空分异特征

2.1.1　植被NDVI时空变化　2000~2022年中国及各主要流域植被NDVI均呈显著上升趋势(P<0.05),植被NDVI增长速率从大到小排序依次为:黄河流域(0.0052a^{-1})>松辽河流域(0.0032a^{-1})>珠江流域(0.0031a^{-1})>海河流域(0.0028a^{-1})>全流域(0.0023a^{-1})>长江流域(0.0019a^{-1})>东南诸河流域(0.0016a^{-1})>内陆河流域(0.0015a^{-1})>西南诸河流域(0.0011a^{-1})>淮河流域(0.0010a^{-1})(图3).

从演化趋势看,中国主要流域植被变化以改善为主,占比为52.02%,其中,呈显著改善的区域占比为44.25%,主要集中在黄河流域中下游和长江流域中游地区,以及内陆河流域南部地区,而退化区域仅占比为2.80%,集中分布在西南诸河流域及内陆河流域,零星分布于长江、淮河、松辽河等流域(图4).

2.1.2　植被转移特征及转移关系动态度　2000~2022年NDVI空间转移分布如图5所示.在研究期间,中国九大主要流域大部分面积为未变化的高植被覆盖,主要分布在长江、珠江、淮河、海河以及东南诸河流域的大部分地区;变化最多为中高植被覆盖→高植被覆盖,主要分布于黄河流域中下游并呈线性向东部扩散,零散分布于松辽河流域西南部;其

次为中低植被覆盖→中高植被覆盖主要分布于黄河流域的北部地区,零散分布于内陆河及西南诸河流域;再次为高植被覆盖→中高植被覆盖集中分布于内陆河流域西北部与西南诸河流域西部地区.整体来看,中国九大主要流域植被变化转移多以流向更高等级为主,生态环境整体向好发展.

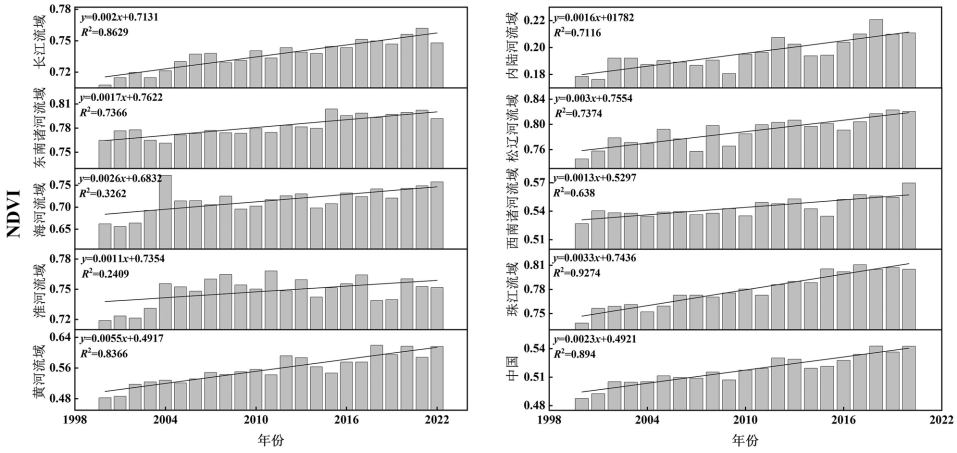


图 3 植被 NDVI 时间变化特征

Fig.3 Characteristics of temporal changes in vegetation NDVI

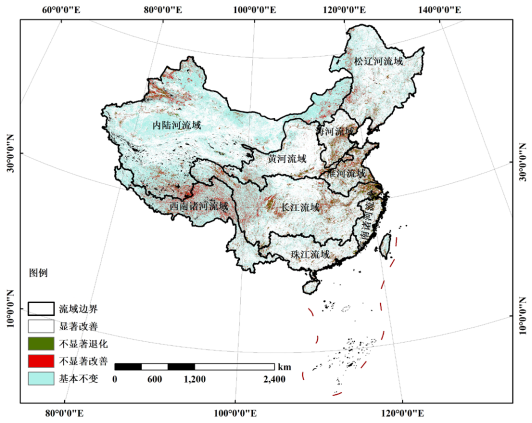


图 4 植被 NDVI Sen+MK 变化趋势

Fig.4 Trend of NDVI Sen+MK in vegetation

审图号:GS(2024)0650 号,底图无修改

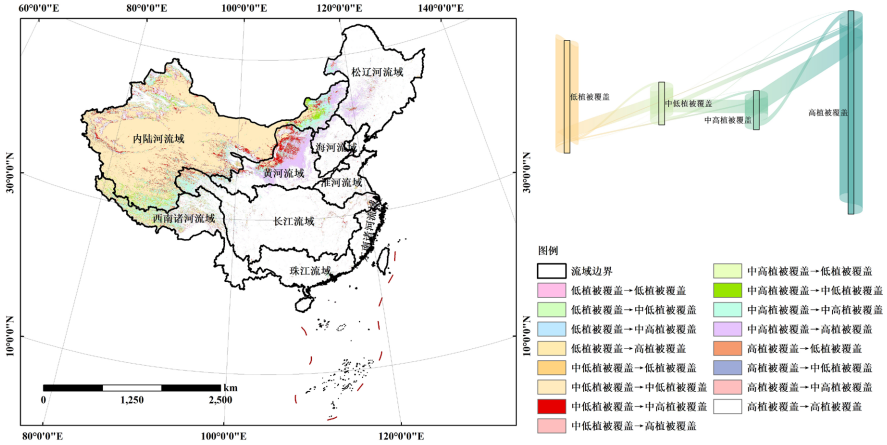


图 5 2000~2022 年植被 NDVI 转移

Fig.5 Vegetation NDVI shifts, 2000~2022

审图号:GS(2024)0650 号,底图无修改

表 1　各研究时段中国植被覆盖变化动态度及综合动态度(%)

Table 1　Dynamic and comprehensive dynamics of vegetation cover change in China during each study period(%)

植被覆盖	变化率				
	2000~2005 年	2005~2010 年	2010~2015 年	2015~2020 年	2000~2020 年
低植被覆盖	−0.07	−0.19	0.17	−0.44	−0.53
中低植被覆盖	−0.70	0.50	−0.35	−0.01	−0.62
中高植被覆盖	−0.41	0.13	−0.17	−0.05	−0.50
高植被覆盖	0.29	−0.01	0.01	0.27	0.58
综合	0.142	0.06	0.05	0.14	0.28

动态度及综合动态度两个指标反映的研究区各植被覆盖变化强度见表 1.从综合动态度来看,植被覆盖变化强度呈现非等速变化,植被覆盖转移变化综合动态度最大的为 2000~2005 年(0.142%/a),其次是 2015~2020 年(0.140%/a),2010~2015 年的值最小(0.050%/a).从植被覆盖变化的动态度来看,高植被覆盖的动态度最大,其值为 0.580%/a,最大值出现在 2000~2005 年.其中,中低植被覆盖的动态度变化最大,2015 年以后,中低植被覆盖动态度增加明显,动态变化度增幅为 97.14%,植被恢复明显,生态环境向好发展.

2.2　植被覆盖时间稳定性

2.2.1　时间稳定性分析　Spearman 秩相关系数法属于非参数检验方法,反映同一变量在不同时间的变化强度和方向.通过 Spearman 秩相关系数(r_s)检验了 2000~2022 年间中国九大主要流域植被覆盖在时间上的相似性(图 6).结果表明,各主要流域的秩相关系数变化范围分别为:0.713~0.986(东南诸河流域)、0.937~1(海河流域)、0.867~1(淮河流域)、0.944~1(黄河流域)、0.965~1(内陆河流域)、0.930~1(松辽河流域),0.881~1(西南诸河流域)、0.930~1(长江流域)和 0.336~0.993(珠江流域),存在显著相关关系($P<0.05$),说明中国九大主要流域的植被覆盖均表现出较强的时间稳定性,故进一步识别各主要流域的代表性子流域.

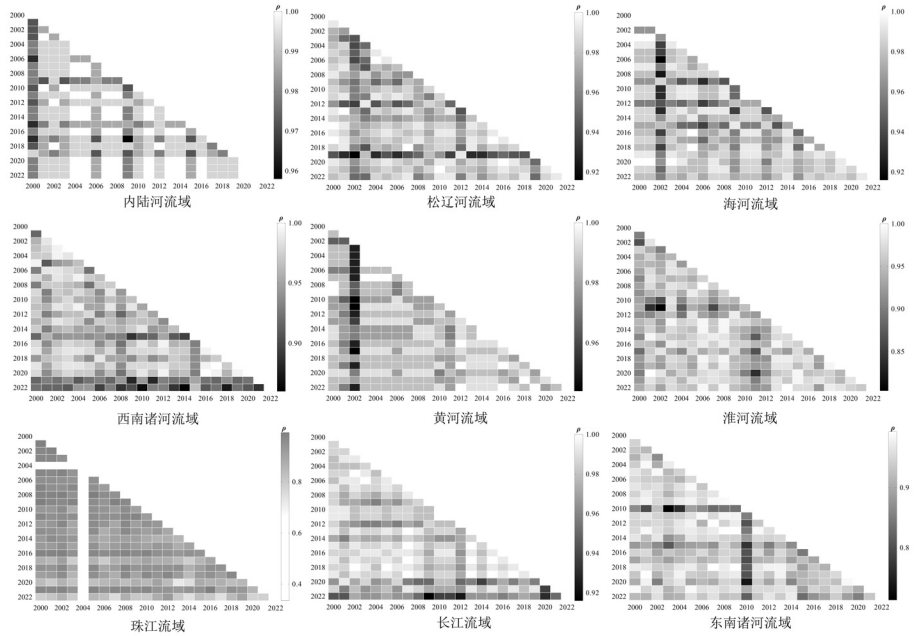


图 6　中国主要流域植被覆盖 Spearman 秩相关系数

Fig.6　Spearman's rank correlation coefficient of vegetation cover at watershed level in China

2.2.2　主要流域的子流域划分与代表性流域的识别　将各主要流域按不同流量阈值划分成若干个子流域,如图 7 所示.

各主要流域植被 NDVI 的 MRD 和 SDRD 值均较小,表明中国各主要流域植被覆盖的时间波动不大.依据时间稳定性代表子流域判定标准,确定了各主要流域的代表性子流域分别为:西南诸河流域(35# 澜沧江流域)、内陆河流域(15# 塔里木河流域)、长江流域(8# 汉江流域)、东南诸河流域(24# 闽江流域)、淮河流域(16# 沂河流域)、海河流域(32# 大清河流域)、松辽河流域(21# 松花江流域)、珠江流域(12# 西江流域)、黄河流域(7# 汾河流域),其中

代表性子流域的名称精确到最小主要流域的一部分,如西南诸河流域的代表性子流域35#为澜沧江流域,即它位于澜沧江流域的某个特定河段或某个支流流域,表述明确子流域的范围(图 8).

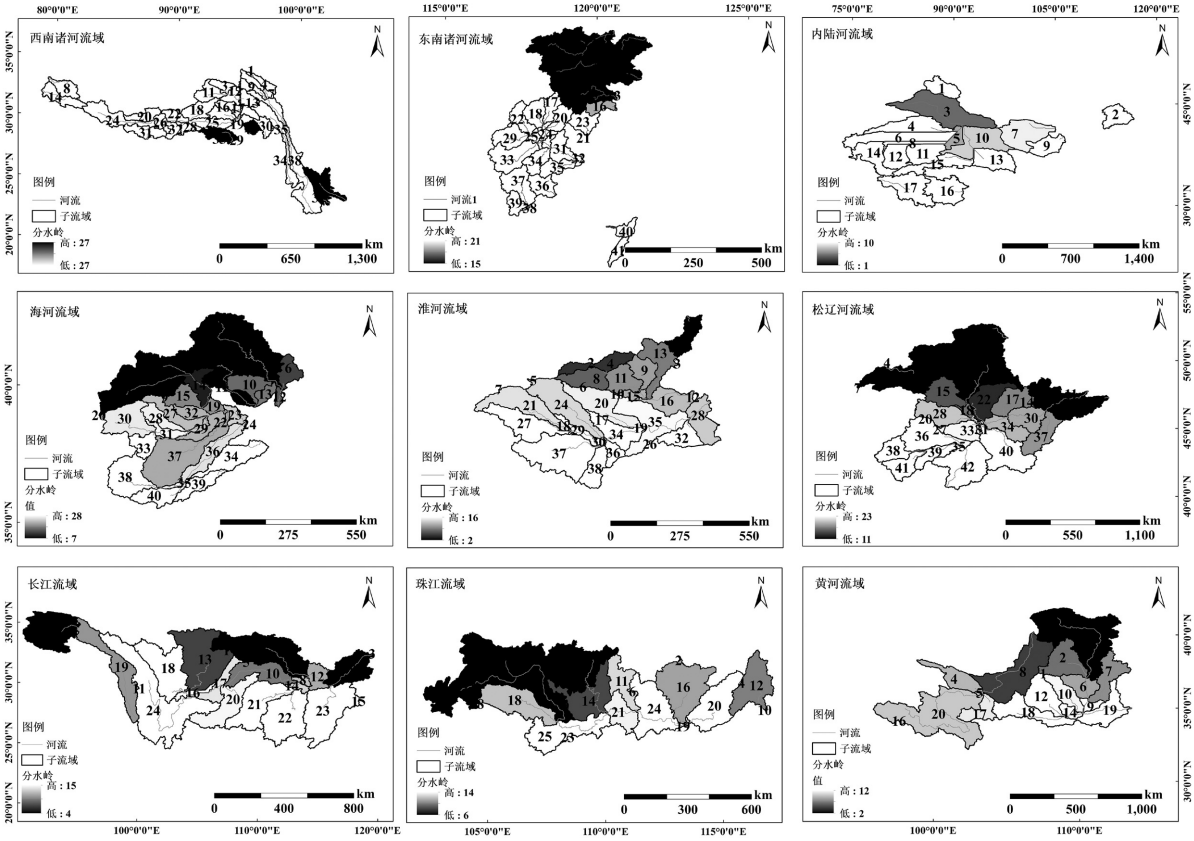


图 7 各主要流域的子流域分布

Fig.7 Distribution of sub-basins within each primary watershed

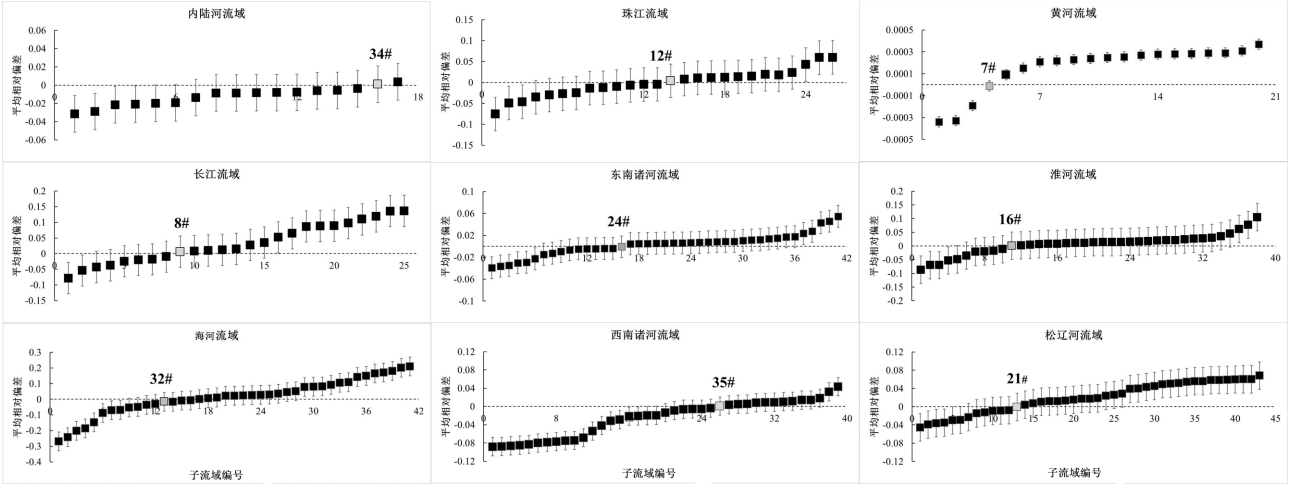


图 8 中国九大主要流域平均相对偏差

Fig.8 Average relative deviation of the nine major primary watersheds in China

数字代表子流域编号

2.3 主要流域植被覆盖变化突变方法的适宜性

2.3.1 突变年份的确定 同一流域采用不同变点检测方法得到的突变点可能存在差异,故本研究结合多种变点检测方法综合分析各要素时间序列确定突变

点,同步得出中国各主要流域长序列检验植被 NDVI 变化突变的适用方法.由表 2 可知,除淮河流域部分检测方法外,其余流域突变均显著.东南诸河流域于 2012 年出现显著突变,海河流域于 2003 年出现显著突变,淮河流域于 2003 年出现显著突变,黄河、珠江、内陆河流域均于 2011 年出现显著突变,松辽河流域于 2010 年出现显著突变,西南诸河流域于 2015 年出现显著突变,长江流域于 2004 年出现显著突变.

表 2　中国主要流域不同突变方法所得突变年份

Table 2　Mutation years obtained by different mutation methods at each runoff station

流域	Pettitt 检验法	有序聚类法	Man-Kendall 法	滑动 T 检验法	累积距平法	曼-惠特尼-皮特 MWP 检验法
东南诸河流域	2012*	2014*	2005*	2008*	2006*	2001*
海河流域	2011*	2003*	2003*	2002*	2003*	2010*
淮河流域	2004*	2003*	2000	2003*	2003*	2003
黄河流域	2012*	2011*	2005*	2011*	2011*	2011*
内陆河流域	2010*	2011*	2010*	2011*	2011*	2009
松辽河流域	2011*	2010*	2010*	2010*	2010*	2010*
西南诸河流域	2011*	2015*	2008*	2015*	2010*	2010*
长江流域	2012*	2004*	2006*	2009*	2009*	2011*
珠江流域	2012*	2011*	2008*	2011*	2011*	2011*
中国	2011*	2011*	2007*	2011*	2011*	2010*

注:*为通过95%的显著性检验,灰色标注部分为突变年份相同的方法.

2.3.2　不同突变方法评估及适宜性　不同的突变检验方法可能会有不同的 T 值计算方式和判断标准,因此在使用时需要根据具体的研究区域和数据特点等选择合适的方法.在不同的突变方法中的 T 或 U 值越高,代表突变的显著性越高或者引物与模板结合的稳定性越好,如有序聚类法、滑动 T 检验法、累积距平法等突变方法中,T 值越高通常代表着数据序列中的突变或异常点越显著,即方法的适宜性越高[38].综合不同流域的不同突变方法,根据其中可以得出相同突变年份的方法得出有序聚类法与滑动 T 检验法更适用大部分流域植被变化的突变检测.对于相同突变年份,以松辽河流域为例,对于相同突变年份不同突变方法检验值排序为$|T|$=5.8430(有序聚类法)=$|T|$=5.8430(滑动 T 法)>$|T|$=5.3753(累积距平法)>$|U|$=4.8328(Man-Kendall 法)=$|U|$=4.8328(曼-惠特尼-皮特 MWP 检验法),故有序聚类法与滑动 T 法适宜松辽河流域突变方法.同理可得,判断各主要流域的适宜突变方法,可知,海河、珠江、内陆河、长江流域适宜的突变方法为有序聚类法,松辽河、淮河、西南诸河流域适宜的突变方法为有序聚类法和滑动 T 检验法,黄河流域适宜的突变方法为滑动 T 检验法(表 3).

表 3　中国主要流域不同突变方法评估

Table 3　Evaluation of different mutation methods in the first-class watershed in China

流域	Pettitt 检验值$\|T\|$ $t(0.05/2)$=2.0796	有序聚类法检验值$\|T\|$ $t(0.05/2)$=2.0796	Man-Kendall 法检验值$\|U\|$ $U(0.05/2)$=1.96	滑动 T 检验值$\|T\|$ $t(0.05/2)$=2.0796	累积距平法检验值$\|T\|$ $t(0.05/2)$=2.0796	MWP 检验值$\|U\|$ $U(0.05/2)$=1.96
东南诸河	$\|T\|$=7.2368	$\|T\|$=8.9672	$\|U\|$=4.516	$\|T\|$=8.9672	$\|T\|$=5.2887	$\|U\|$=4.516
海河	$\|T\|$=2.2888	$\|T\|$=4.9312	$\|U\|$=3.8292	$\|T\|$=4.9312|	$\|T\|$=2.2888	$\|U\|$=3.8292
淮河	$\|T\|$=3.5760	$\|T\|$=6.7323	$\|U\|$=1.558	$\|T\|$=6.7323	$\|T\|$=4.3430	$\|U\|$=1.558
黄河	$\|T\|$=3.9778	$\|T\|$=5.9908	$\|U\|$=5.150	$\|T\|$=5.9908	$\|T\|$=4.7101	$\|U\|$=5.150
内陆河	$\|T\|$=6.0081	$\|T\|$=6.0081	$\|U\|$=4.4105	$\|U\|$=4.4105	$\|T\|$=6.0081	$\|U\|$=4.410
松辽河	$\|T\|$=4.8397	$\|T\|$=5.8430	$\|U\|$=4.833	$\|T\|$=5.8430	$\|T\|$=5.3753	$\|U\|$=4.833
西南诸河	$\|T\|$=3.8453	$\|T\|$=4.8906	$\|U\|$=3.4597	$\|T\|$=4.8906	$\|T\|$=4.1206	$\|U\|$=3.459
长江	$\|T\|$=4.6436	$\|T\|$=6.0396	$\|U\|$=5.361	$\|T\|$=5.4717	$\|T\|$=4.9734	$\|U\|$=5.361
珠江	$\|T\|$=7.0060	$\|T\|$=7.9518	$\|U\|$=5.5196	$\|T\|$=7.9518	$\|T\|$=7.6010	$\|U\|$=5.519
中国	$\|T\|$=5.5666	$\|T\|$=6.7354	$\|U\|$=5.625	$\|T\|$=6.7354	$\|T\|$=5.5666	$\|U\|$=5.625

注:标注部分为$|T/U|<t/U(0.05/2)$,表明未通过95%显著性检验;其余为$|T/U|>t/U(0.05/2)$,表明通过95%的显著性检验.

3 讨论

3.1 植被变化原因

中国主要流域植被 NDVI 均呈现上升的趋势,即植被呈改善趋势,主要得益于 21 世纪初国家实施的生态修复政策,如治理过度放牧、防治土壤侵蚀、推行“陡坡改梯田”及构建绿洲防风固沙体系等措施.黄河流域中下游和长江流域中游地区的植被改善主要得益于多方面因素的共同作用.在气候方面, 2000 年以来,黄河流域的降水量总体呈增加趋势,降水量平均每年增加4.2mm,气温升高0.03℃,这些气候条件有利于植被生长.特别是在黄河中游地区,降水和气温的变化对植被改善起到了积极作用[39]. 2000~2021 年,长江中游流域降水量平均每年增加 7.3mm,气温呈升高趋势,这些气候条件为植被生长提供了更充足的水分和热量,延长了植被的生长期[40].同时,长江中游流域温暖湿润的气候条件以及纵横交错的水系和星罗棋布的湖泊和水库,降低了植被生长对气候变化的敏感性,加速了土壤有机质的分解,进一步促进了植被的生长,有利于植被覆盖度的提高[41].在人类活动方面,这些区域实施了如“三北防护林”、退耕还林还草等生态工程[42-43],同时开展水土保持措施,减少了水土流失,提升了植被覆盖度[44-45](图 9).此外,黄河流域中下游土壤质量较好,适合植被生长,而在长江中游地区实施的退耕还林还草、坡耕地水土流失综合治理等生态工程,以及平坦的地形条件共同作用,有效促进了植被的改善和恢复.

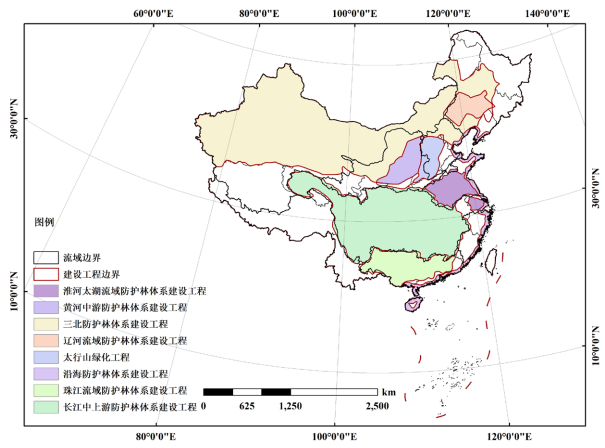


图 9 中国林业工程空间分布

Fig.9 Spatial distribution of forestry projects in China

2000~2022 年,中国主要流域大部分面积为未变化的高植被覆盖,主要分布在长江、珠江、淮河、海河以及东南诸河流域的大部分地区.这可能在于这些区域气候条件相对稳定,降水量和气温变化不大,为植被提供了稳定的生长环境.同时,人类活动影响相对平衡,生态工程和水土保持措施的有效实施平衡了其他可能导致植被变化的人类活动影响.此外,这些地区的土壤和地形条件适宜,有利于植被生长[46,48].综上所述,这些地区高植被覆盖的维持是气候条件、人类活动、土壤和地形条件以及政策支持等多方面因素相互作用的结果.

3.2 时间稳定性影响因素分析

在区域植被动态变化的监测中,相对某一时期,与植被空间格局密切相关的气候、地形地貌等因素相对稳定,但人类活动对区域的植被影响较大.人类活动对区域植被的影响是多方面的,包括森林砍伐、农业活动、城市化进程、气候变化与人类活动的综合效应以及人类活动对植被格局的改变等[49].人类活动对区域植被变化的影响可以通过在土地利用的变化来反映.研究区土地利用类型大面积转移发生在 2015~2020 年间,且以耕地、草地和建设用地变化最为明显,可能是由于中国处于生态文明建设的阶段,实施了大规模的生态工程,植被生长存在一定的滞后效应[50](图 10).且 2000~2020 年间,林地、耕地、未利用土地面积转移明显,转移面积占比分别为37.15%、18.84%、20.85%,其中以建设用地转移为林地为主,面积为 491712km^2(占比 18.68%),这可能与生态保护和恢复、城市绿化和美化、土地利用规划和农业结构调整等有关.

时间稳定性结果表明,珠江流域的秩相关系数变化范围较其他流域明显更大,原因可能是由于珠江流域年最大日流量序列趋势性变化受气候变化、人类活动、水文过程非一致性及流域内区域差异影响.气候变化表现为近 60a 流域平均温度显著上升,中部和东部地区降水密度增加、长历时降水减少、短历时降水强度增加.人类活动包括东江流域 3 大水库的修建使年最大日流量序列非一致性明显,西江干流和北江因河道采砂等人为作用使流量序列上升趋势显著,流域内采砂活动和水土保持工作也影响了珠江河口区水沙变化.水文过程非一致性使珠江流域年最大日流量序列变化范围较大,流域内不同区域水文特征和变化趋

势的差异,如西江、北江、东江等支流的不同情况,也导致整体秩相关系数变化范围较大.在区域植被动态变化监测中,与植被空间格局密切相关的气候、地形地貌、土壤性质等要素在特定时期相对稳定,符合时间稳定性研究的条件,体现了植被稳定性的代表性.然而,不同地区的植被覆盖变化差异显著,且受多种因素影响.因此,代表性子流域具备一定的植被覆盖代表性,需准确反映区域植被动态变化特征,还需要进一步的探讨影响区域植被变化的驱动机制.

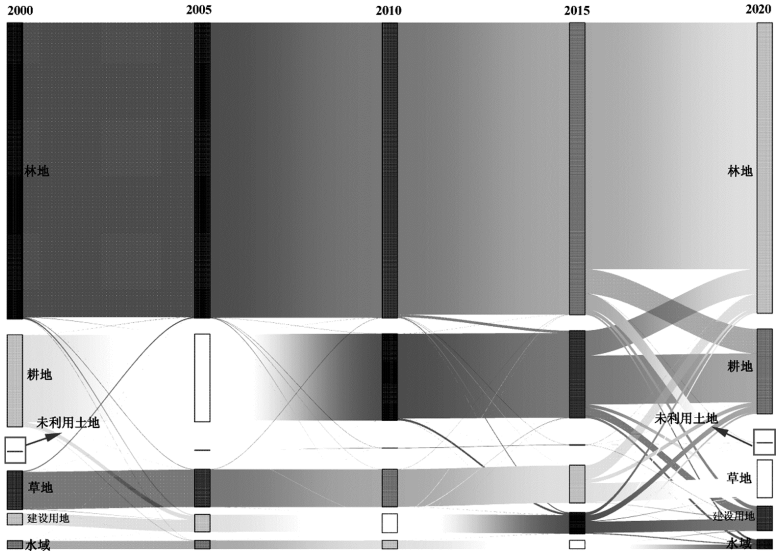


图 10　不同时期土地利用类型变化

Fig.10　Changes in land use types at different periods

3.3　突变年份成因分析

气候植被 NDVI 突变年份是自然与人类活动共同作用的“生态信号”,其识别不仅能揭示植被变化的驱动机制,为流域生态保护、气候变化适应、水资源管理等提供精准的时间锚点与科学依据.气候变化、生态修复工程的实施、自然灾害的影响以及极端事件的发生等可能引起植被 NDVI 的突变.黄河流域植被 NDVI 于 2011 年发生突变,可能是气候变化和人类活动等多种因素共同作用的结果,其突变年份与退耕还林还草、天然林保护等生态工程时间段相吻合,如区域生态工程迎来阶段性成果,内蒙古、陕西等地集中完成陡坡耕地还林验收,且“草灌乔混交”模式推广提升灌木成活率,黄土高原水土保持工程累计治理水土流失面积 23 万 km^2,减沙效应显著并增强土壤保水能力;地方性生态修复工程实现突破,黄河三角洲生态补水和包头黄河国家湿地公园建设恢复湿地植被并稳定群落结构,结合同期气候数据(降水仅增加 8%),故人类活动等因素为引起突变的主要原因[51].2012 年东南诸河流域植被 NDVI 发生显著突变,主要由大规模生态工程实施及政策协同效应共同驱动,如“四边”绿化工程与公益林扩面、福建省 300 万 hm^2 造林绿化工程的规模化实施以及地方创新机制的建立等.在钱塘江、瓯江等流域沿线实施林相改造,补植珍贵树种(如楠木、红豆杉)70 万 hm^2,形成生态廊道,以及杭州市绕城高速两侧 50m 范围内种植乔木 30 万株,使得植被 NDVI 值显著上升[52].

2015 年西南诸河流域植被 NDVI 突变是生态工程集中实施与石漠化综合治理成效显现共同作用的结果,如西南喀斯特地区 2015 年完成石漠化治理面积约 800km^2.广西平果果化示范区通过“山顶封育、山腰经济林、山脚保土耕作”模式,使得植被覆盖度从 2008 年的 35%提升至 2015 年的 68%,土壤侵蚀模数下降 44%.以及广西都安瑶族自治县“封山育林+坡改梯+沼气池”综合措施的实施,使得小流域综合治理取得显著成效,2015 年治理小流域 23 条,新增植被覆盖面积 80 万 km^2[53-54].2011 年,内陆河流域可能遭受了大范围的干旱影响,导致植被生长受限,干旱引发水分胁迫,使植被光合作用受限,生长减缓,从而导致植被覆盖度降低,引起植被

NDVI 突变.2004 年长江流域植被 NDVI 突变是退耕还林工程的规模化推进、天然林保护工程的深化实施,以及气候条件的阶段性协同效应,2004 年是退耕还林工程从“大规模扩张”转向“质量提升”的关键节点,政策调整直接推动植被覆盖度跃升,同期流域内的气温和降水提供了有利条件,工程区森林管护面积从 2003 年的 8783 万 hm^2 增至 2004 年的 9215 万 hm^2,重点加强金沙江、雅砻江等上游天然林保护,禁止商业性采伐区域扩大至 90%以上[55-56].海河、珠江及淮河流域位于沿海地区,城市化和工业化进程加快,大量修建水利工程、围垦等改变了流域的下垫面状况和水文过程,对水资源的开发利用强度加大,也加剧了流域水文情势的变化,进一步加剧了植被 NDVI 的变化[57-61].辽宁省实施辽河干流封育工程,2010 年完成退耕还河 4.3 万 hm^2,河滩地植被覆盖率达 100%,土壤侵蚀模数下降 52%.铁岭市昌图段通过“退耕还湿+植被重建”,新增芦苇湿地 2.65 万 hm^2,NDVI 值较 2005 年上升 0.18.通过黑土地保护与农业结构的调整,黑龙江省推广“秸秆还田+深松整地”技术,2010 年完成黑土地保护性耕作面积 1200 万 hm^2,土壤有机质含量提升 0.6%,玉米带 NDVI 值明显提高[62].

对生态环境进行监测与评估时,突变年份为区分自然与人为驱动因素的“时间标尺”,是生态环境变化的关键节点,可以通过突变年份的识别,帮助区分驱动生态环境变化的自然与人为因素,即 NDVI 突变识别定位植被动态变化转折点,结合气候突变分析和人类活动数据,可精准解析驱动机制,为生态恢复、灾害预警提供科学依据[63].其次,可精准识别植被变化的临界事件,通过突变年份锁定驱动事件,如海河流域 NDVI 在 2003 年突变上升,结合气象数据发现该年气温、降水均未发生显著变化,与地下水超采高峰期(年均开采 500 亿 m^3)重叠[57],为后续“南水北调”工程效果评估提供基线对比.同时也是生态系统阈值预警的“早期信号”,通过识别植被覆盖转折临界年份,预警生态系统服务功能衰退风险,为生态恢复、灾害预警提供科学依据.最后,在遥感监测中作为数据分段点,优化趋势分析模型,避免掩盖真实生态转折,如精准刻画区域 NDVI“政策前缓慢变化→政策后加速恢复”的双阶段特征,是长期生态监测的“动态校准器”.

4 结论

4.1 中国主要流域植被 NDVI 均呈显著上升趋势(P<0.05).其中,黄河流域增长速率最高,为 0.0052a^{-1};松辽河流域次之,为 0.0032a^{-1};淮河流域最小,增长速率仅为 0.001a^{-1}.空间分布整体上呈现出由东南到西北递减的趋势特征,植被变化以显著改善为主,占比为 44.25%,主要集中在黄河流域中下游和长江流域中游地区,以及内陆河流域南部地区,且植被覆盖变化以流向更高等级为主.

4.2 中国各主要流域的代表性子流域分别为:西南诸河流域(35# 澜沧江流域)、内陆河流域(15# 塔里木河流域)、长江流域(8# 汉江流域)、东南诸河流域(24# 闽江流域)、淮河流域(16# 沂河流域)、海河流域(32# 大清河流域)、松辽河流域(21# 松花江流域)、珠江流域(12# 西江流域)、黄河流域(7# 汾河流域).

4.3 综合不同流域和突变方法,有序聚类法与滑动 T 检验法较适用于大部分流域植被覆盖变化的突变点检测.在相同突变年份的方法比较中,这两种方法也更适用于大部分流域植被变化的突变检测.不同流域各有适宜的突变方法,东南诸河流域适宜 Pettitt 检验法;海河、内陆河、珠江、长江流域适宜有序聚类法;松辽河、淮河、西南诸河流域适宜有序聚类法和滑动 T 检验法;黄河流域适宜滑动 T 检验法.

参考文献:

[1] Yan Z, Luo qi Z, Junyi W, et al. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu–Chongqing region, China [J]. Ecological Indicators, 2023,155.

[2] 王永锋,靖娟利,刘海红,等.顾及时滞和累积效应的西南喀斯特地区植被变化归因分析 [J]. 环境科学, 2025,46(7):4382-4391.
Wang Y F, Jing J L, Liu H H, et al. Attribution analysis of vegetation variation in the karst region of Southwest China considering time lag and accumulation effects [J]. Environmental Science, 2025,46(7): 4382-4391.

[3] Ting C, Jun X, Lei Z, et al. Quantifying the influences of natural factors and human activities on NDVI changes in the Hanjiang River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2020,12(22):3780-3780.

[4] Lian X, Piao SL, Li Laurent, et al. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation [J]. Science Advances, 2020,6(1):eaax0255.

[5] Tuoku L, Wu Z, Men B. Impacts of climate factors and human activities on NDVI change in China [J]. Ecological Informatics, 2024, 81102555-.

[6] 刘 畅,任小丽,张 黎,等.三江源国家公园 NPP 长时序时空变化多

模型集成分析 [J]. 地理学报, 2024,79(9):2356−2371.
Liu C, Ren X L, Zhang L, et al. Spatio−temporal variation of net primary productivity in Three−River−Source National Park using a multi−model integration method [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(9):2356−2371.

[7] Wang B, Jia K, Wei X, et al. Generating spatiotemporally consistent fractional vegetation cover at different scales using spatiotemporal fusion and multiresolution tree methods [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,167:214−229.

[8] Jiao W, Wang L, Smith W K, et al. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades [J]. Nature Communications, 2021,(12):3777.

[9] Guo H, Wang X, Guo Z, et al. Assessing snow phenology and its environmental driving factors in Northeast China [J]. Remote Sensing, 2022,14(2):262.

[10] Yating R, Feng Z, Chunli Z, et al. Attribution of climate change and human activities to vegetation NDVI in Jilin Province, China during 1998~2020 [J]. Ecological Indicators, 2023,153:10415.

[11] 陈　峰,王世杰,赵晓恩,等.20 世纪以来中国北方干旱半干旱区针叶树种径向生长动态变化 [J]. 地理学报, 2024,79(9):2341−2355.
Chen F, Wang S J, Zhao X E, et al. Radial growth dynamics of coniferous species in arid and semi−arid areas of northern China since the 20th century [J]. Acta geographica sinica 2024,79(9):2341−2355.

[12] Yi W, Wang N, Yu H, et al. An enhanced monitoring method for spatio−temporal dynamics of salt marsh vegetation using google earth engine [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2024,298,108658.

[13] Uribeetxebarria A, Castell´on A, Aizpurua A. A first approach to determine if it is possible to delineate in−season N fertilization maps for wheat using NDVI derived from sentinel−2 [J]. Remote Sens. −Basel, 2022,14(12):2872.

[14] 林艺真,邱炳文,陈芳鑫,等.干旱胁迫下植物抗逆性大尺度遥感监测方法 [J]. 地球信息科学学报, 2022,24(11):2225−2233.
Lin Y Z, Qiu B W, Chen F X, et al. Remote sensing monitoring method for plant stress resistance under drought stress on large scale [J]. Journal of Geo−information Science, 2022,24(11):2225−2233.

[15] 协子昂,张　超,冯绍元,等.植被物候遥感监测研究进展 [J]. 遥感技术与应用, 2023,38(1):1−14.
Xie Z A, Zhang C, Feng S Y, et al. Reviews of methods for vegetation phenology monitoring from remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023,38(1):1−14.

[16] Tian J, Han Z B, Bogena H R, et al. Estimation of subsurface soil moisture from surface soil moisture in cold mountainous areas [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020,24(9):4659−4674.

[17] Yang W J, Zhao Y, Wang Q M, et al. Climate, CO_2, and anthropogenic drivers of accelerated vegetation greening in the Haihe River Basin [J]. Remote Sensing, 2022,14:268.

[18] 秦肖伟,程　博,杨志平,等.基于时序遥感影像的西南山区地块尺度作物类型识别 [J]. 地球信息科学学报, 2023,25(3):654−668.
QinX W, Cheng B, Yang Z P, et al. Identification of parcel−scale crop types in southwestern mountainous area based on time series remote sensing images [J]. Journal of Geo−information Science, 2023,25(3): 654−668.

[19] Ma B, Wang S, Mupenzi C, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes in the Upper White Nile River. Remote Sensing, 2021,13:3648.

[20] Liu C, Liu J, Zhang Q, et al. Attribution of NDVI dynamics over the globe [J]. Remote Sens.−Basel, 2022,14(11):2706.

[21] Vachaud G A, Silans A P D, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985,49(4):822−828.

[22] 刘登峰,田富强,黄　强.基于代表性单元的流域水沙耦合模型及其应用 [J]. 水力发电学报, 2015,34(4):22−30.
Liu D F, Tian F Q, Huang Q.Tsinghua hydrological model based on representative elementary watershed coupling sediment and its application [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2015,34(4):22−30.

[23] 刘　源,田　杰,王水献.祁连山草地坡面土壤水时空动态及时间稳定性 [J]. 高原气象, 2024,43(5):1249−1258.
Liu Y, Tian J, Wang S X. Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture on grassland slopes in Qilian Mountains [J]. Plateau Meteorology, 2024,43(5):1249−1258.

[24] 梁朝文,马海华.民勤荒漠区不同林龄人工梭梭林土壤水分时间稳定性研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2025,56(2):147−157.
Liang C W, Ma H H. Study on temporal stability of soil moisture in Haloxylonammodendronplantationsof different ages in the Minqin desert area]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025,56 (2):147−157.

[25] Zhou X, Hu K, Xiao H, et al. Effects of vegetation on the spatiotemporal distribution of soil water content in re−vegetated slopes using temporal stability analysis [J]. Catena, 2023,234.

[26] ZhangJ Y, Zhao H L. Review on the study of vegetation stability [J]. cje, 2003,(4):42−48.

[27] 申子傲,吴　静,李纯斌.基于生态水文最优性理论的河西内陆河流域植被覆盖模拟 [J]. 草业学报, 2024,33(9):15−27.
Shen Z A, Wu J, Li C B. Simulation of vegetation cover in the inland river basin of Hexi based on the theory of ecohydrological optimality [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024,33(9):15−27

[28] He Z, Yue T, Chen Y, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and driving forces in the Yan River Basin, Loess Plateau [J]. Remote Sensing, 2023,15(17):4240.

[29] 寇杰锋,杨　超,张莹莹,等.黄河中下游伊洛河流域 2002~2021 年植被覆盖度时空变化及影响因素分析 [J]. 灌溉排水学报, 2024,43(1): 89−96.
KouJ F, Yang C, Zhang Y Y, et al. Spatio−temporal variation of fractional vegetation cover and its influencing factors in the Yiluo River basin of the middle and lower reaches of the Yellow River from 2002 to 2021 [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(1):89−96.

[30] 侯　迎,黄欣慧,褚　阳,等.黄河“几字弯”大气水分亏缺及其影响因素的时空变化特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):637647.
Hou Y, Huang X H, Chu Y, et al. Spatiotemporal variability of atmospheric moisture deficit and its influencing factors in the “Jizi Bay” of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2025, 45(2):637647.

[31] Pinna D, Sozzi M, Pornaro C, et al. Modelling vegetation phenology in alpine grasslands of North−East Italy integrating microclimatic and meteorological Drivers: A 23−Years Time−Series analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,232:110154−110154.

[32] 杜中曼,马文明,周青平,等.基于遥感技术的植被识别方法研究进展 [J]. 生态科学, 2022,41(6):222−229.
DuZ M, MaW M, ZhouQ P, et al. Research progress on vegetation identification methods based on remote sensing technology [J]. Ecological Science, 2022,41(6):222−229.

[33] Gocic M and Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann−Kendall and Sen′s slope estimator statistical tests in Serbia [J]. Global & Planetary Change, 2013,100:172−182.

[34] Yanlin W, Xiaofeng L, Lingjia G, et al. Spatiotemporal changes of snow depth in Western Jilin, China from 1987 to 2018 [J]. Chinese

Geographical Science, 2024,34(2):357−368.

[35] Chebana, Fateh et al. Testing for multivariate trends in hydrologic frequency analysis [J]. Journal of Hydrology, 2013,486:519−530.

[36] Wang T, Wedin D A, Franz T E, Hiller J. Effect of vegetation on the temporal stability of soil moisture in grass−stabilized semi−arid sand dunes [J]. Hydrol (amst), 2015,521:447−459.

[37] Gao L, Shao M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers [J]. Catena (amst), 2012,95:24−32.

[38] 钱筱暄.不同突变检验方法在萧濉新河流域径流序列中的研究 [J]. 世界生态学, 2024,13(2):274−281.
Qian X X. Study on runoff sequence of Xiaosuixin River Basin by different mutation test methods [J]. International Journal of Ecology, 2024,13(2):274−281.

[39] 中国气象局.2022 年全国生态气象公报 [R]. 北京:中国气象局, 2023,(36).
China Meteorological Administration. 2022 National Ecological Meteorological Bulletin. Report. Beijing: China Meteorological Administration, 2023,(36).

[40] 孙应龙,韩佳芮,陈紫璇,等.2000~2021 年长江中游流域气候对植被和生态系统服务功能的影响分析 [J]. 环境生态学, 2024,6(6):99−108.37.
Sun Y L, HanJ R, ChenZ X, et al. Impacts of climate on vegetation and ecosystem services in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2021 [J]. Environmental Ecology, 2024,6(6):99−108.37.

[41] 易 扬,胡昕利,史明昌,等.基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系 [J]. 生态学报, 2021,41(19):7796−7807.
Yi Y, Hu X L, Shi M C, et al. Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in the middle reaches of the Yangtze River Based on MODIS NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7796−7807.

[42] Hu Y, Li H, Wu D, et al. LAI−indicated vegetation dynamic in ecologically fragile region: A case study in the Three−North Shelter Forest program region of China [J]. Ecological Indicators, 2021, 120106932−.

[43] Xie S, Mo X, Hu S, et al. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO_2 and human activities to ET and GPP trends in the Three−North Region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,295.

[44] Liu D, Chen J, Ouyang Z. Responses of landscape structure to the ecological restoration programs in the farming−pastoral ecotone of Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2020,710136311.

[45] Sun Z H, Mao Z A, Yang L Y,et al. Impacts of climate change and afforestation on vegetation dynamic in the Mu Us Desert, China [J]. Ecological Indicators, 2021,129.

[46] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers [J]. Nature Climate Change, 2016,6(8):791−795.

[47] Yao Y T, Wang X H, Li Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years [J]. Global Change Biology, 2018,24(1):184−196.

[48] 钟超慧,陈甲豪,杨 涵,等.基于核归一化植被指数数据的中国西部四省自然保护区保护成效评估 [J]. 生态学报, 2025,45(3):1−11.
Zhong C H, Chen J H, Yang H, et al. Assessment of conservation effectiveness in nature eserves of four provinces in western China based on kernel Normalized Difference Vegetation Index data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(3):1−11.

[49] 阎世杰,王 欢,焦珂伟.京津冀地区植被时空动态及定量归因 [J]. 地球信息科学学报, 2019,21(5):767−780.
Yan S J, Wang H, Jiao K W. Spatiotemporal dynamic of NDVI in the Beijing−Tianjin−Hebei region based on MODIS data and quantitative attribution [J]. Journal of Geo−information Science, 2019,21(5):767−780.

[50] Wang B, Xu G, Li P, et al. Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China [J]. Ecol. Indic., 2020a,108,105719.

[51] Liu C, Zhang X, Wang T, et al. Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River Basin from 2003 to 2020 [J]. Ecological Indicators, 2022,138:108818−.

[52] Meng Z, Liu M, Gao C, et al. Greening and browning of the coastal areas in China's mainland: Spatial heterogeneity, seasonal variation and its influential factors [J]. Ecological Indicators, 2020,110:105888−.

[53] Yan W, Wang H, Jiang C, et al. Satellite view of vegetation dynamics and drivers over Southwestern China [J]. Ecological Indicators, 2021.

[54] 吕 妍,张 黎,闫慧敏,等.中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因 [J]. 生态学报, 2018,38(24):8774−8786.
Lv Y, Zhang L, Yan H M, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38 (24):8774−8786.

[55] Ji G, Song H, Wei H, et al. Attribution analysis of climate and anthropic factors on runoff and vegetation changes in the source area of the Yangtze River from 1982 to 2016 [J]. Land, 2021,10(6):612.

[56] Chen W, Yuan Y, Liu Z, et al. Ecosystem health in the Yangtze and Yellow River basins in China: Regional differences and driving forces [J]. Ecological Indicators, 2024,166:112422.

[57] Qin Y, Yang D, Lei H, et al. Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960~2010 [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526:55−67.

[58] 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]. Sci. Total Environ., 2019,650:2051−2062.

[59] Zhang W Q, Dai L, Yan Y G, et al. Multiscale geographically weighted regression−based analysis of vegetation driving factors and mining−induced quantification in the Fengfeng District, China [J]. Ecol. Inform., 2024,80:102506.

[60] 陈文裕,夏丽华,徐国良,等.2000~2020 年珠江流域 NDVI 动态变化及影响因素研究 [J]. 生态环境学报, 2022,31(7):1306−1316.
ChenW Y, Xia L H, XuG L, et al. Dynamic variation of NDVI and its influencing factors in the Pearl River Basin from 2000 to 2020 [J]. Ecology and Environment, 2022,31(7):1306−1316.

[61] 刘芃凯,饶良懿.海河流域植被变化时空分异及影响因素探测 [J]. 环境科学, 2025,46(4):2352−2362.
Liu F K, Rao L Y. Detection of the spatial and temporal differentiation and influencing factors of vegetation changes in the Haihe River Basin [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2352−2362.

[62] 李 霞,张国壮,陈永昊,等.农牧交错带辽河流域 2010~2019 年植被覆盖变化及驱动因素分析 [J]. 农业工程学报, 2022,38(22):63−72.
Li X, Zhang G Z, Chen Y H, et al. Vegetation cover change and driving factors in the agro−pastoral ecotone of Liaohe River Basin of China from 2010 to 2019 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022,38(22):63−72.

[63] Nan L, Yang M, Wang H, et al. Assessment of spatio−temporal dynamic vegetation evolution and its driving mechanism on the Kubuqi Desert using multi−source satellite remote sensing [J]. Remote Sensing, 2024,16(24).

作者简介：柯浩成(1986−),男,甘肃武威人,副教授,博士,主要从事寒旱区水资源的高效利用研究.发表论文 20 余篇.kehc@lut.edu.cn.