方 贺,王 阔,李正泉,等.长江三角洲地区植被生态质量动态变化特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4513-4523.
Fang H, Wang K, Li Z Q, et al. Dynamic characteristics of vegetation ecological quality in the Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4513-4523.

长江三角洲地区植被生态质量动态变化特征

方 贺[1],王 阔[1],李正泉[1*],樊高峰[1],何 月[1],王治海[1],石守海[2] (1.浙江省气候中心,浙江 杭州 310051；2.武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要：为了解长江三角洲地区(长三角地区)植被生态变化及其时空格局,采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、变异系数等方法,分析了2000~2023 年长三角地区植被生态质量指数(VEQI)的时空演变特征,并采用地理探测器模型探究了自然因素和人类活动对 VEQI 空间分异的驱动机制.结果表明:长三角地区 VEQI 在 2000~2023 年间整体呈波动性上升趋势,平均每年增长 0.29,表明研究区内植被生态状况呈持续改善状态;研究区以植被 VEQI 的改善为主,整体改善的区域面积占比为 82.61%,退化区域占比仅为 15.04%;研究区 VEQI 的稳定性较好,低和较低波动变化区域面积占比分别 54.66%和15.99%;研究区 VEQI 的动态变化主要受自然因素和人类活动的共同影响,空间异质性主要受土地利用、海拔、坡度等因素驱动,自然因素和人类活动的共同作用对空间异质性的解释力提高显著.本研究成果旨在为长三角地区植被恢复工程实施和生态环境保护政策制定提供技术支撑.

关键词：植被生态质量；MODIS 数据；时空变化特征；影响因素；长江三角洲地区
中图分类号：X87 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4513-11

Dynamic characteristics of vegetation ecological quality in the Yangtze River Delta. FANG He[1], WANG Kuo[1], LI Zheng-quan[1*], FAN Gao-feng[1], HE Yue[1], WANG Zhi-hai[1], SHI Shou-hai[2] (1.Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310051, China；2.School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan University, Wuhan 430072, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4513~4523

Abstract：In the circumstance of global change, studying the dynamic changes of vegetation and the factors that influence it holds immense practical significance to monitor the quality of the regional ecological environment and improve the structure and function of ecosystems. In this study, the Theil-Sen Median trend analysis along with Mann-Kendal was used to characterize the overall change trend of vegetation ecology across the Yangtze River Delta based on the vegetation ecological quality index (VEQI) time series data (2000~2023). Then, the coefficient variation method was utilized to evaluate the stability in VEQI from 2000 to 2023. The geographic detector model was used to explain the natural and human activities driving mechanism of VEQI change. The results demonstrate that: The overall VEQI values in the Yangtze River Delta area showed a stage upward trend, with an increasing rate of 0.29a^{-1}. The upward trends observed in the VEQI indicated an enhancement in the ecological environment of the investigation area; The area whose VEQI increased was much larger than the area whose VEQI decreased. The area with improved VEQI accounted for 82.61% of the total area while the vegetation degradation areas for only 15.04%. The VEQI of study area owned a better stability, with low and relatively low fluctuation areas accounting for 54.66% and 15.99% of the area, respectively. The VEQI spatial variation primarily affected by a range of variances in natural phenomena and human activities, whereas spatial heterogeneity was mainly driven by factors such as landform type , elevation and slope. The improvement in the explanatory power of anthropogenic factors for spatial heterogeneity when combined with natural factors was significant. The research results aim to offer guidance for the execution of vegetation restoration initiatives and the establishment of policies for the preservation of the ecological environment in the upstream region of the Yangtze River Delta.

Key words：vegetation ecological quality；Modis data；spatio-temporal variation characteristics；influence factor；the Yangtze River Delta area

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在调节能量流动、维护生物多样性和减少水土流失方面具有重要意义,被称为全球气候变化的“指示器”[1].尤其在人类活动剧烈的城镇化地区,植被常被作为生态环境变化的监测指标,可以反映陆地生态系统各要素之间的相互作用关系[2-3].因此,定量评估植被时空变化规律不仅为区域生态环境保护提供决策支持,也可为城市热岛、土地利用规划以及碳循环等研究提供科学支撑[3].

收稿日期：2025-01-22
基金项目：浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C03190);浙江省自然科学基金资助项目(LZJMZ23D050001);浙江省气象局科技项目(2022ZD06,2022ZD10,2023ZDZL05,2024ZD09);中国气象局卫星专项(FY-3(03)-AS-12.13);中国气象局青年创新团队项目(CMA2023QN12)
* 责任作者, 正高级工程师, lizhengquan@cma.gov.cn

植被覆盖度(FVC)和净初级生产力(NPP)是表征植被生长状况和健康程度的两个关键特征量,已被广泛应用于植被动态变化监测方面[4-7].然而,单一使用植被 NPP 或 FVC 来评估某一地区植被生长状况的结果可能不够全面,存在着植被 NPP 不同但 FVC 相同或 FVC 相同但 NPP 不同的情况,不能够系统的反映该地区植被的综合生态质量问题.鉴于此,相关研究[8]基于 EOS/MODIS 卫星数据和逐日地面气象观测资料,构建了既能反映植被 NPP 又能反映植被 FVC 的综合植被生态质量指数(VEQI),为评估全国植被生态质量动态提供了数据基础和方法支撑.目前,广大学者利用 VEQI 数据集在黄河流域[9]、浙江省[10]、石羊河流域[11]、海南热带雨林公园[12]等区域开展了植被生态的时空分布特征和驱动因素研究,并取得了一系列研究成果.然而,上述研究多侧重于从单一因子入手对 VEQI 的驱动因子进行分析,常忽略多种因子如何协同作用于 VEQI 的变化,而这可能会影响人们对植被生态变化驱动机制的科学认识,导致区域生态修复建设效果有所偏差.

地理探测器是一种空间数据探索分析模型,能够准确识别和分析各种地理现象的空间异质性及其驱动力,并通过定量分析不同驱动因子的权重程度揭示多因子之间的交互作用[13-14].大量研究指出,某一地区的植被生态变化不是单一因子影响的,而是自然因素和人类活动等多种因素共同驱动的.此外,自然因素和人类活动对植被变化的影响并非孤立存在或单独作用的,而是相互联系、相互作用和相互制约.任何一个因素的变化必然会引起其他因素对植被变化的影响[15-16].相较于传统的回归分析等方法,利用地理探测器开展植被生态驱动机制的分析是解释植被生态变化复杂驱动因素的有效手段,该模型在揭示影响植被生态的驱动因素方面得到了广泛的应用[17-20].

长江三角洲地区（长三角地区）是中国经济核心区域之一,同时也拥有大面积森林、农田和湿地等生态系统,为地区提供了重要的生态服务功能.然而,由于经济发展和人类活动的影响,这些生态系统面临破坏和退化的风险.城市化进程改变了陆地生态系统的功能和结构,加速了长三角地区植被时空动态演变.以往针对长三角地区植被变化的影响机制研究大多侧重于自然因素的单一作用[21-23],缺乏对自然和人类活动综合作用及其交互影响对植被 VEQI 的定量分析.基于此,本研究利用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验以及变异系数等方法,对长三角地区 VEQI 时空变化特征进行系统分析.在此基础上,利用地理探测器模型定量分析多种驱动因子与植被 VEQI 的相关性,揭示影响 VEQI 空间异质性的主要驱动机制.研究成果旨在为区域乃至全国生态文明建设和环境保护提供科学依据和数据支撑.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

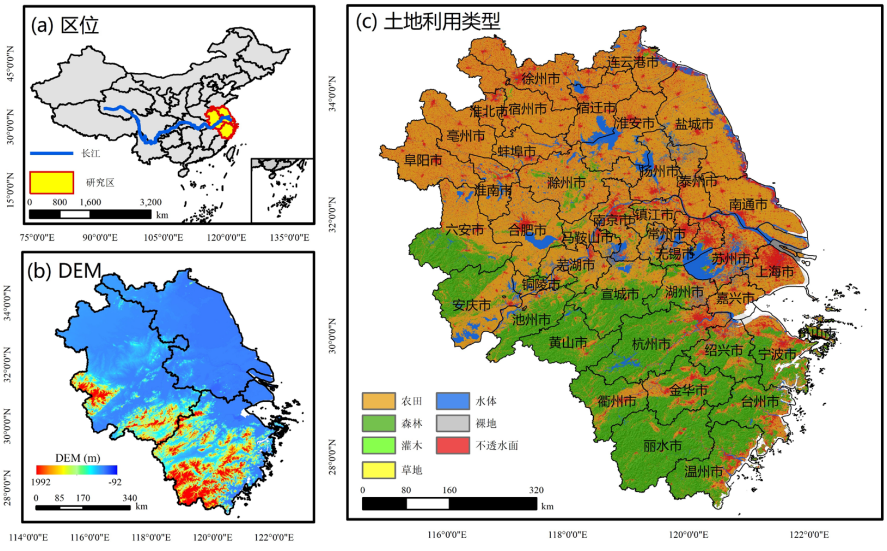


图 1 长三角地区(a)区位、(b)DEM 以及(c)土地利用类型

Fig.1 (a) Location, (b) elevation and (c) land cover type of in the Yangtze River Delta

长三角地区地处中国东部沿海、长江下游地区,是“一带一路”与长江经济带的重要交汇地带,也是我国经济最为发达、城镇化基础最好和开放程度最高的区域之一.根据 2019 年国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,长三角地区规划范围包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省全域共计 41 个城市(图 1).长三角地区地形复杂,有森林、山地、平原、丘陵和山地多种地貌,地势由西南向东北逐渐降低.同时,该地区生态系统具有多样性特征,包括阔叶林、针叶林、灌木和人工植被等(图 1).在气候方面,长三角地区属亚热带季风气候,四季分明，雨热同期[22].

1.2　数据来源

表 1　驱动因子对照信息

Table 1　Comparison table of driving factors

驱动因子	指标	单位	数据源
*X*1	数字高程	m	美国地质调查局 (https://www.usgs.gov/)
*X*2	坡度	°	
*X*3	坡向	/	
*X*4	平均降水量	mm	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
*X*5	平均温度	℃	
*X*6	日照时数	h	
*X*7	相对湿度	%	
*X*8	蒸散量	mm	
*X*9	夜光指数	/	国家青藏高原数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn)
*X*10	国内生产总值密度	万元/km^2	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
*X*11	人口密度	万人/km^2	
*X*12	土地利用	/	
*X*13	河流地平距离	km	
*X*14	居民区地平距离	km	

本研究使用的数据主要分为两类.第一类是植被指数卫星遥感产品资料;第二类是用于分析植被生态变化的 14 个驱动因子资料(表 1).植被指数资料来自美国国家航空航天局(NASA)的 MOD13A3 数据集中的逐月归一化植被指数(NDVI)数据,空间分辨率为 1km,时间分辨率为 16d,利用国际通用的最大合成法获取 2000~2023 年长三角地区逐年 NDVI 数据.降水、气温、日照、蒸散量等气象资料来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)发布的高精度气象指标栅格资料,空间分辨率为 0.008333°(约 1km),这些资料通过了大量独立气象观测数据的验证,结果真实可信,采用 Arcgis 软件批量重采样值 1000m 精度数据.数字高程模型(DEM)数据来源于美国地质调查局(https://www. usgs.gov/),通过 Arcgis 3D 分析工具计算得出坡度和坡向等地形参数.年际夜光指数资料来自国家青藏高原数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)发布的中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集,空间分辨率 1km.国内生产总值(GDP)、人口密度和土地利用等社会经济数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/). 为了统一时空尺度,利用 Arcgis 和 Matlab 软件将上述 14 个影响因子数据进行格式转换、重采样和投影裁剪等预处理,使用自然间断点法进行连续的数据重分类,且保证驱动因子的分辨率为 1km.

1.3　研究方法

1.3.1　植被生态质量指数　植被 NPP 和 FVC 是反映区域植被生长状况的两个重要指标,因此本文采用基于植被 NPP 和 FVC 所构建的 VEQI 作为评价指标,反映研究区植被生态状况变化特征,计算方法如下[8-9]:

$$\mathrm{VEQI}_i = 100 f_1 \times \mathrm{FVC}_i + f_2 \times \frac{\mathrm{NPP}_i}{\mathrm{NPP}_{\max}} \tag{1}$$

式中:VEQI_i 表示第 i 年的植被生态质量指数,其值在 0~100 之间变化.FVC_i 表示第 i 年的植被覆盖度均值,采用像元二分法模型计算[3-4];NPP_i 表示第 i 年的植被净初级生产力,本文采用陆地生态系统碳通量模型(TEC)进行计算[24].TEC 模型具有因子获取简单、符合中国植被实际情况等特点,广泛应用于不同区域植被 NPP 估算方面[8,10-11].NPP_{max} 表示研究区全年植被 NPP 的历史最高值,即当地最好气候条件下的年植被 NPP.$\mathrm{NPP}_i/\mathrm{NPP}_{max}$ 是一个介于 0 ~ 1 之间的无量纲比值,它通过将实际植被 NPP 与理论最大潜力进行归一化,消除了地理或气候背景差异的影响,使不同区域的植被生产力可直接比较;f_1 和 f_2 分别为研究区植被 NPP 和 FVC 的权重系数,可以根据区域及植被类型进行调整,本研究取 f_1=f_2=0.5[8].为了便于分析,根据研究区 VEQI 实际分布状况将 VEQI 分为 5 个等级:低(0~30)、中低(30~45)、中等(45~60)、中高(60~75)和高值(75~100).

1.3.2　趋势分析　为了研究长三角地区 VEQI 时空变化趋势及分布特征,本研究使用广泛应用于植被长时间序列 Theil−Sen 趋势分析[14,19]计算栅格资料每个像元上 NDVI 时间序列的变化率(S).当 S>0 时,表示长三角地区 VEQI 在研究时间呈上

升趋势,反之则呈下降趋势.利用 Mann−Kendall 方法对变化趋势进行显著性检验.对于给定的置信区间α，若 $Z \geqslant Z_{1-a/2}$ 时,则拒绝原假设,认为变化趋势显著[14-15].

1.3.3 稳定性分析 变异系数可以反应长时间序列观测数据的相对波动程度,从而具体衡量数据的稳定性.本研究采用变异系数法研究 2000~2023 年长三角地区 VEQI 的变化的稳定性,计算公式如下:

$$C = \frac{1}{\overline{V}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i - \overline{V})^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中:C 为变异系数;n 为数据年份;V_i 为第 i 年的植被生态质量结果;$\overline{V}$ 为植被生态质量均值.根据研究区情况,将稳定性分为 5 个程度[7,25]:低波动变化(0~0.05)、较低波动变化(0.05~0.1)、中等波动变化(0.1~0.15)、较高波动变化(0.15~0.2)和高波动变化(>0.2).

1.3.4 地理探测器 地理探测器是研究空间分异性及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,主要包括因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互探测器.本文利用地理探测器模型,定量分析 2000 ~ 2023 年长三角地区 VEQI 的驱动力及其多因子交互作用[13-14,16,18].

因子探测器主要探测不同环境因子对 VEQI 空间分异的影响大小,并用 q 值来衡量.q 值介于 0 ~ 1 之间,且 q 越大说明影响因子对 VEQI 的空间分布的程度越高.q 值计算方法如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{W}{T} \tag{3}$$

$$W = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \tag{4}$$

式中:h 表示 VEQI 值影响因子的分类或分区;σ_h^2 和 σ^2 分别表示层 h 和全区 Y 值的方差;T 和 W 分别为全区总方差和层内方差之和.

交互探测器主要评价不同因子 X 之间的交互作用,即揭示不同影响因子共同作用时对 VEQI 的解释力是减弱还是增强.具体方法是首先计算两种影响因子 $X1$ 和 $X2$ 对 Y 的 q 值,并记为 $q(X1)$和 $q(X2)$;随后计算它们交互作用后的因子 $X1 \cap X2$ 的 q 值,记为 $q(X1 \cap X2)$;最后对 $q(X1)$、$q(X2)$和 $q(X1 \cap X2)$的值进行比较,主要分为以下几种结果(表 2).

风险探测器用于揭示不同驱动因子对 VEQI 的影响的类型或适宜范围,用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\overline{Y}_{h=1} - \overline{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\mathrm{Var}(Y_{h=1})}{n_h = 1} + \frac{\mathrm{Var}(Y_{h=2})}{n_h = 2}\right]^{1/2}} \tag{5}$$

式中:$\overline{Y}_h$ 为子区域 h 内 VEQI 的均值;n_h 为子区域 h 内的样本量;Var 为方差.

表 2 交互探测器判断依据

Table 2 Judgment basis of interaction detector

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$\min(q(X1), q(X1)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X1))$	单因子非线性减弱

生态探测器用于比较两个因子 $X1$ 和 $X2$ 对 VEQI 空间分布的影响是否有显著差异,用统计量 F 表示:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1)W_{X1}}{N_{X2}(N_{X1} - 1)W_{X2}} \tag{6}$$

式中:N_{X1} 和 N_{X2} 表示两因子的样本量;W_{X1} 和 SSW_{X2} 表示两因子形成分层的层内方差之和.

2 结果与分析

2.1 长三角地区 VEQI 时间变化特征

时间尺度上, 2000~2023 年长三角地区 VEQI 呈波动性上升趋势,上升斜率为 0.29a^{-1}(图 2).2000~2023 年研究区植被 VEQI 平均值为 54.42,最大值出现在 2023 年,为 58.1;最小值出现在 2001 年,为 49.05.2000~2023 年研究区各省市 VEQI 均呈波动性上升趋势,其中安徽省 VEQI 上升趋势最为明显,为 0.36a^{-1};浙江省上升速率次之,为 0.28a^{-1};江苏省和上海市上升速率较低,分别为 0.22a^{-1} 和 0.21a^{-1}.浙江省 2000~2023 年平均 VEQI 最高,为 61.66,其次为安徽省,为 57.63,其次是安徽省为 57.63.江苏省和上海市多年 VEQI 均值较低,分别是 49.57 和 43.08.总的来说,2000~2023 年长三角地区整体及各省(市)的植被 VEQI 均呈上升趋势.其中, 安徽省植被 VEQI 上升趋势最为显著, 浙江省整体植被 VEQI 状况优于其他省(市).

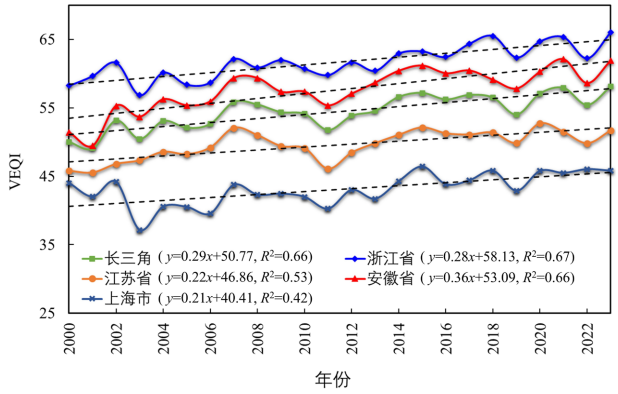


图 2　2000~2023 年长三角地区植被 VEQI 变化趋势

Fig.2　Temporal variation of VEQI in the Yangtze River Delta from 2000 to 2023

2.2　长三角地区 VEQI 空间变化特征

长三角地区 VEQI 空间分布存在明显的异质性,总体呈现南高北低、西高东低、中部偏低的分布格局(图 3).其中,丽水市、黄山市和池州市 VEQI 均值较高,分别为 74.2、71.56 和 67.45.从整体来看,长三角地区 VEQI 较好,中等及以上 VEQI 面积占比为 87.11%.采用 Theil-Sen 斜率分析和 Mann-Kendall 显著性检验研究长三角地区 2000~2023 年 VEQI 变化趋势(图 4).分析可知,近 23a 来研究区绝大部分地区 VEQI 呈改善趋势,面积占比为 82.61%.研究期间长三角地区 VEQI 空间变化以显著改善面积占比最大(45.3%),主要分布在安徽北部和南部以及浙江省中北部.VEQI 显著退化和轻微退化的像元在研究区内呈零星分布状态,主要分布在江苏省中部、太湖流域城市群以及杭嘉湖平原地区.

2000~2023 年长三角地区 VEQI 的整体稳定性较好,较低波动变化区域面积占比最高,为 54.66%,广泛分布于长三角各个地区.中等波动变化区域的占比为 22.83%,主要分布在安徽省北部和江苏北部地区.低波动变化区域面积占比为 15.99%,主要分布安徽省西南部、浙江省北部和东南部等地区.较高波动变化区域面积占比较少,为 4.10%,零星分布在浙江省北部和江苏省南部.高波动变化区域面积占比最少,为 2.43%,主要在上海市中部、浙江省北部以及江苏省东部沿海地区有分散分布.

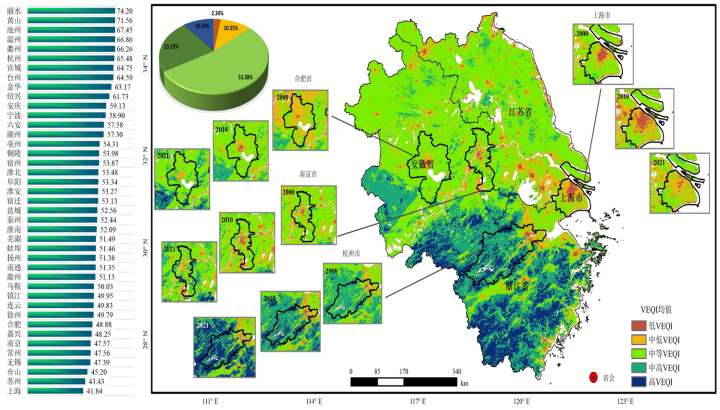


图 3　长三角地区 VEQI 均值空间分布

Fig.3　Spatial distribution of FVC in the Yangtze River Delta

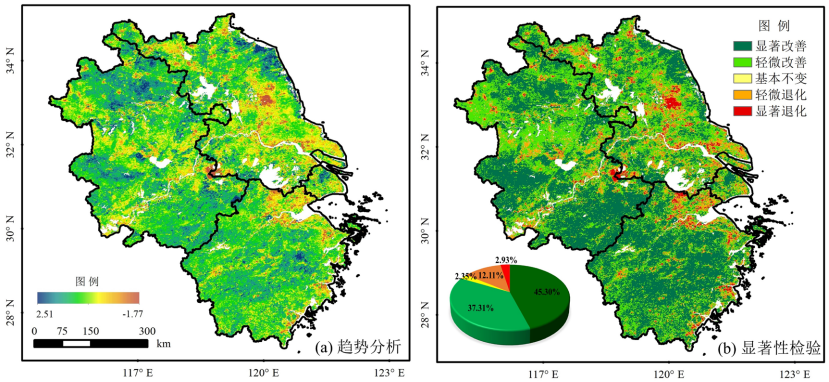


图 4　2000~2023 年长三角地区 VEQI 变化趋势和显著性检

Fig.4　Chang trend of VEQI in Yangtze River Delta from 2000 to 2023

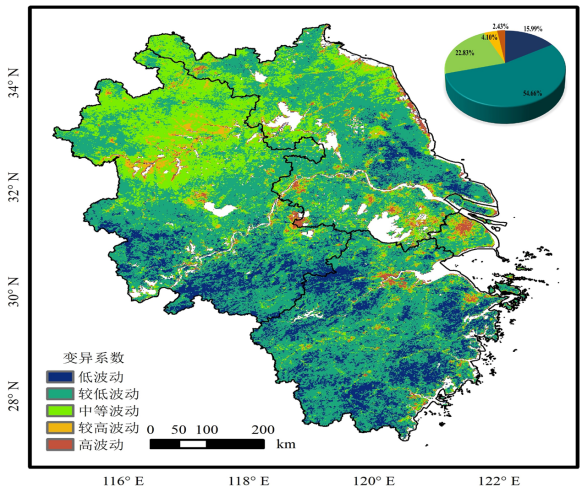


图 5 长三角地区植被 VEQI 变异系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variation coefficients in the Yangtze River Delta

2.3 长三角地区 VEQI 演变驱动力分析

本研究选取 14 种驱动因子对长三角地区 VEQI 空间分异进行驱动分析.通过计算各驱动因子的 q 值(表 3)可以看出,各因子对 VEQI 影响程度的排序为:土地利用(0.566) > 海拔高度(0.419) > 坡度(0.395) > 年降水量(0.290) > 夜光指数(0.250) > 日照(0.209) > 人口密度(0.170) > 相对湿度(0.135) > GDP(0.115) > 气温(0.099) > 蒸散量(0.061) > 居民区地平距离(0.041) > 河流地平距离(0.038) > 坡向(0.001).土地利用和海拔高度的 q 值最大,是长三角地区 VEQI 变化的主要驱动因;坡度、年降水量、夜光指数、日照时数的 q 值均超过了 0.2;人口密度、相对湿度和 GDP 的 q 值均超过了 0.1.气温、蒸散量、居民区地平距离、河流地平距离和坡向的 q 值均小于 0.1,其中坡向的 q 值最小,仅为 0.001,对研究区 VEQI 的变化几乎不产生影响.

表 3 各驱动因子的决定值 q

Table 3 Decision value q of each driving factor

因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
q 值	0.419	0.395	0.010	0.290	0.099	0.209	0.135	0.061	0.250	0.115	0.170	0.566	0.038	0.0410
p 值	0.000	0.000	0.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

基于交互探测器研究不同驱动因子之间影响 VEQI 变化的相互关系(图 6).结果表明,研究区两个因子作用下的 q 值明显大于单因子的 q 值,任意两个 VEQI 影响因子的交互作用均呈双因子增强或非线性增强趋势,说明交互作用的两因子更能增强对研究区 VEQI 因子影响力的解释.依据解释力 q 值大小对主导交互作用因子进行排列,最重要的 3 个交互作用分别为蒸散发量∩土地利用类型、夜光指数∩土地利用类型、高程∩土地利用类,交互作用因子对研究区 VEQI 的解释力均超过了 60%,分别为 65.3%、65%和 61.2%.此外,高程与其他因子的交互作用对研究区 VEQI 的解释力也较强,交互作用因子的 q 值均超过了 0.410.在所有的交互作用检测分析中,坡向与其他因子的解释力相对较差,在与各因子的组合结果中排在较低位.同样,坡向、居民区地平距离和河流地平距离等因子的组合结果对 VEQI 的解释力也较弱.这些结果进一步支持了因子探测分析得出的结论,即土地利用、海拔和坡度对研究区 VEQI 影响较大,坡向、居民区地平距离和河流地平距离对 VEQI 影响较小.

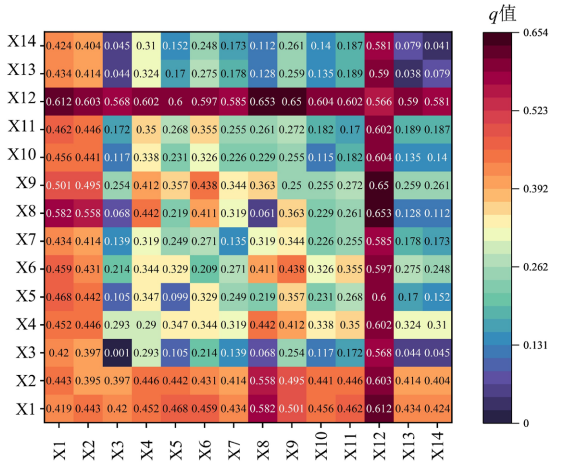


图 6 各驱动因子之间交互作用探测

Fig.6 Interaction detection between the factors

利用风险探测器对研究区各驱动因子的适宜范围及类型进行了分析(图 7).分析结果表明,土地利用类型不同会导致 VEQI 的值不同.当土地利用类型为林地时,长三角地区 VEQI 最大,因此林地是植被状况最佳的土地利用方式.在气象因子方面,年均降雨量在 1789~2486mm,气温在 17.5~18.1℃,日照在 10.1~10.8h,相对湿度在 79%~82%,蒸散量在 786~

824mm 时,研究区 VEQI 达到最大值.在地形因子方面,高程在 680~872m,坡度在 16~27°时达到最大值.VEQI 随坡向的变化不大,最大值出现在背面.由因子探测分析可知(表 3),高程是长三角地区 VEQI 变化的主要地形驱动因子.在社会因子方面,夜光指数在 0~295h,GDP 在 100~3900 元/km^2,人口密度在 26~354 人/km^2,居民区地平距离 49.5~88.1km,河流地平距离 62.8~87.6km 时 VEQI 达到最大值.

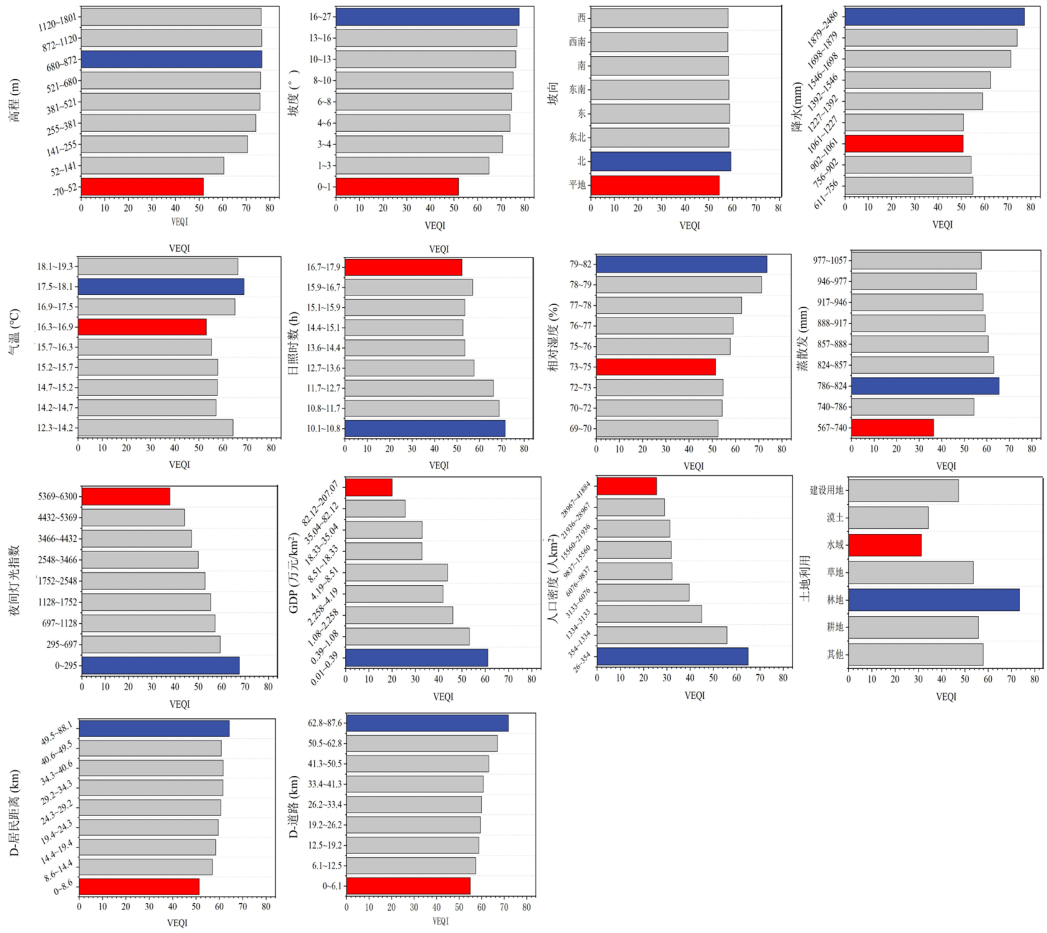


图 7　驱动因子适宜区间(置信水平 95%)

Fig.7　Suitable interval of driving factors (95% confidence level)

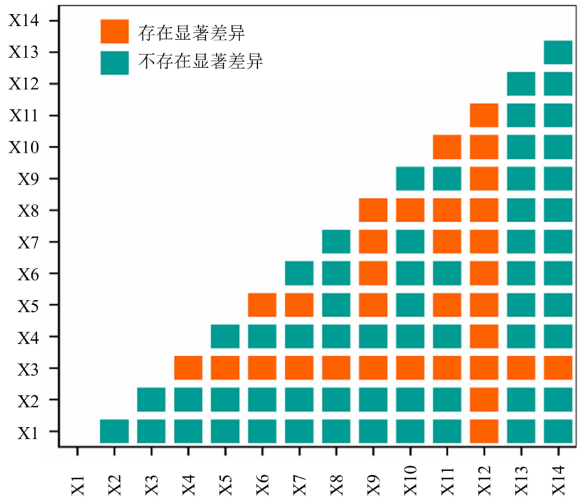


图 8　长三角地区生态探测显著性统计(置信水平 95%)

Fig.8　Interaction detection between the factors leading to VEQI changes in the Yangtze River Delta

通过生态探测可以分析不同因子组合对研究区 VEQI 变化的解释力之间的显著性差异(图 8).经过统计性分析,可以得出两种影响因子的差异是否显著,其置信度为 95%.分析显示,土地利用类型与居民区地平距离、河流距平距离对研究区 VEQI 空间分布的影响不具有显著差异,而与其他因子均具有显著差异.坡向除了与坡度、高程不具有显著性差异外,与其他因子对 VEQI 的空间分布均具有显著性差异.

3　讨论

3.1　长三角地区 VEQI 时空演变特征

时间趋势上,2000~2023 年长三角地区植被 VEQI 呈明显上升趋势,平均每年增加 0.29,这意味着研究区植被状况得到了明显改善,与前人在研究区

得到的植被生态状况基本一致[7,10,22,26].然而,这种增长是呈波动性的,其主要原因在于极端气候事件发生频率和强度的增加导致自然灾害频发,这将造成植被 VEQI 在短期内出现下降,然后逐渐恢复(图 3).Yuan 等[21]研究发现,长三角地区的植被状况对温度的响应在时间上几乎没有滞后.例如,2019 年植被 VEQI 明显下降,可能是受厄尔尼诺现象影响,造成旱涝交替,削弱了植被的生长能力[27].2022 年我国南方地区夏季高温及其伴随的夏季伏旱特点,对长江流域的植被生长造成严重影响[28].

在空间分布上,长三角地区 VEQI 呈现出明显的空间分异特征,即南高北低、西高东低、中部偏低的分布格局,与前人对研究区植被状况的研究结论一致[29-31].造成这一空间分布特征的原因主要与研究区的地理环境特征有关.长三角地区西南部山地众多(图 1),为植被的生长提供了重要的自然资源基础,并形成了具有恢复力的森林生态系统.例如,地形条件可以限制土地利用的变化,减轻人类活动对植被的干扰[32],而植被的生长环境在一定范围内随海拔升高而增强[33],因此浙江省南部和安徽省西南部海拔较高的山地区域 VEQI 明显高于其他区域.研究还发现,长三角地区 82.61%区域面积的 VEQI 呈改善趋势(图 6),这与中国政府采取的生态修复工程密切相关,这些工程有助于减轻人类干预对植被的影响,使得区域生态环境质量得到明显改善,这与已有研究结果一致[34-36].江苏省南部、浙江省北部以及上海市等经济发达地区 VEQI 维持在较低水平,且这些区域往往呈分散性且向外扩展,这与城市化区域的扩张模式相吻合[37-38].造成这一现象的原因在于人口增长和城市化水平的加快对建设空间的需求增加,导致了大面积植被和农田覆盖的土地变成了城市建筑用地,这种转变直接或间接的侵占了植被赖以生存在生态空间[39].此外,植被 VEQI 的稳定性与气候波动和地貌条件有关.长三角地区整体水热条件良好,植被生态能够一直处于稳定的状态.然而,在经济发达的城市及周边地区 VEQI 波动性较高,城市化进程导致大量林地、草地和耕地转化为建设用地是造成 VEQI 不稳定的主要因子[26,37].

3.2 长三角地区 VEQI 变化驱动分析

长三角地区地形地貌多样,资源禀赋差异明显,社会经济发展较快,自然条件和人类活动均对植被生态产生了重要影响,但人类活动对植被 VEQI 的影响大于自然因素.前人研究侧重于气候因子在长三角地区植被生长中的重要作用[21,23,40],与本研究结论略有不同.这种差异主要由两个方面原因造成.首先,地处长三角地区属于亚热带季风气候,气候温暖湿润,区域气候特征差异性较小,植被生长对气候变化的敏感性降低.其次,长三角地区经济发展迅速,城镇化水平高,研究区内人类活动对 VEQI 的影响非常显著,降低了自然因素对 NDVI 的影响.退耕还林、植树造林生态工程等人类活动因素对研究区植被恢复效果明显,可以直接或间接地减轻气候因子对水生态脆弱区植被生态的影响.

因子探测结果表明,土地利用类型、海拔高度和坡度因子是影响研究区 VEQI 变化的主要因子.我国城镇化进程的加快对土地利用结构产生了很大影响,土地利用格局与植被变化的相关性愈发重要[32,37].长三角地区 VEQI 低值区主要分布在各大城市主城区,这主要是由于工业化、城镇化进程引发的土地利用类型的转变所致.海拔高度对植被的生长起着至关重要的作用,其通过一系列生物过程以及影响局部区域的水热通量来影响植被生长,从而极大地增加植被空间分异[41-42].此外,坡度可以通过影响地表径流来影响植被生长,对 VEQI 的变化也具有重要作用[43].除了上述主导因素外,年降水量、夜光指数和日照等因素也是长三角地区植被生长和恢复的关键,表明不同因子的综合作用对研究区 VEQI 的空间分布和变化产生明显影响.

交互作用探测结果显示,土地利用与高程的交互作用对 VEQI 空间分异的解释力最强,呈现双因子增强效应(q = 0.612).高程通过影响区域的水热条件和土地开发难度[25,44-45],间接调控了土地利用的空间分布.例如,高海拔地区由于地形限制,土地开发成本高,土地利用多以林地和自然植被为主[34-44],因此 VEQI 较高;低海拔平原地区便于开展农业和城市建设,土地利用类型多为农田和建设用地,导致植被覆盖减少,VEQI 较低[45].土地利用类型反过来通过改变地表覆盖状况(如林地增加蒸散量,建设用地增加地表径流)进一步影响局部小气候条件,从而放大或减弱高程对植被生态的作用.这种双向协同作用使得二者的交互效应显著强于单一因子的独立贡献[44].此外,土地利用与蒸散量、夜光指

数等因子的交互作用也呈现双因子增强,表明人类活动与自然因子的共同作用是驱动长三角地区VEQI 空间异质性的关键机制.例如,土地利用类型通过改变地表蒸散能力(如林地的高蒸散量对比建设用地的低蒸散量)与蒸散量协同作用,共同影响植被的水分供给和生长条件[47];而夜光指数反映的人类活动强度(如城市化水平)通过驱动建设用地扩张,与土地利用类型共同作用,进一步加剧了植被生态质量的空间分异[34].

3.3　不足与展望

地理探测器模型在植被生态空间分异驱动机制分析方面有着广泛的应用,但在应用该模型过程中,影响因素的空间分类尚无统一的方法,数据输入和分类时多采用自然间断点分类方法,人为主观性较大,导致驱动因子的选取不够准确[14,42].此外,政策规划、公众生态环保意识等因素如何影响长三角地区植被生态变化目前尚无法进行量化分析.在后续研究中,需要对多源数据的分类方法开展进一步研究,并结合社会经济水平和城市建设水平等指标,建立较为完善的驱动力因子库, 以更综合地识别引起植被生态质量变化的主要因素,为该区域自然资源的利用提供科学支撑,实现社会经济的可持续发展.

4　结论

4.1　从时间变化上看,2000~2023 年长三角地区VEQI 呈现波动上升趋势,平均每年增加 0.29.从空间分布上看,研究区 VEQI 整体较好,呈现明显的北高南低、西高东低的格局.

4.2　基于 Sen 趋势的分析结果表明,近 23 年来研究区 VEQI 空间变化以改善为主,面积占比为 82.61%.从稳定性来看,研究期间长三角地区 VEQI 稳定性以较低波动和低波动变化为主,分别占研究区总面积的 54.66%和 15.99%.

4.3　通过地理探测器对长三角地区 VEQI 影响因素的研究表明,土地利用类型对 VEQI 空间分异的主要解释因素,其次是高程.除此之外,坡度、年降水量、夜光指数、日照时数也是影响 VEQI 空间分异的主要因素,其解释力(q 值)均超过了 0.2.气温、蒸散量、居民区地平距离、河流地平距离和坡向的 q 值均小于 0.1.各驱动因子对研究区 VEQI 影响存在交互作用,且以双因子增强或者非线性增强为主,其中土地利用与其他因子的交互作用是最强的,解释力都在 0.550 以上.

参考文献:

[1] 李泳君,陈青长,方　贺,等.基于MGWR的长江流域植被演化及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):352−362.
LI Y J, Chen Q C, Fang H, et al. Vegetation evolution and its influencing factors in the Yangtze River Basin based on multi-scale geographical weighted regression [J]. China Environmental Science, 2024,44(1):352−362.

[2] 吴炳伦,孙　华,石军南,等.2000~2018 年深圳市植被覆盖动态变化与预测 [J]. 应用生态学报, 2020,31(11):3777−3785.
Wu B L, Sun H, Shi J N, et al. Dynamic change and prediction of vegetation cover in Shenzhen, China from 2000 to 2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(11):3777−3785.

[3] 方　贺,严佩文,石　见,等.阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制 [J]. 干旱区研究, 2022,39(6):1907−1916.
Fang H, Yan P, Shi J, et al., Temporal and spatial variation of vegetation ecological quality and its driving mechanism in Aksu prefecture [J]. Arid Zone Research, 2022,39(6):1907−1916.

[4] 康　娟,方　贺,石守海,等.阿克苏地区天然林保护工程区植被覆盖度变化及驱动因子研究 [J]. 测绘通报, 2024,(5):41−47.
Kang J, Fang H, Shi S H, et al. Chang and driving factors of vegetation coverage in the natural forest protecting project area of Aksu prefecture [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024,(5): 41-47.

[5] Liu Y, Han X, Weng F, et al. Estimation of terrestrial net primary productivity in China from Fengyun-3D satellite data [J]. Journal of Meteorological Research, 2022,36(3):401−416.

[6] Zhang M, Yuan N, Lin H, et al. Quantitative estimation of the factors impacting spatiotemporal variation in NPP in the Dongting Lake wetlands using Landsat time series data for the last two decades [J]. Ecological Indicators, 2022,135:108544.

[7] Tian, X R, Tao, Z, Xie Y, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Fractional Vegetation Coverage in the Yangtze River Delta. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024,17:10979−10997.

[8] 钱　拴,延　昊,吴门新,等.植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型 [J]. 生态学报, 2020,40(18):6573−6583.
Qian S, Yan H, Wu M X, et al. Dynamic monitoring and evaluation model for spatio-temporal change of comprehensive ecological quality of vegetation. Acta Ecologica Sinica [J]. 2020,40(18):6573−6583.

[9] 曹　云,孙应龙,陈紫璇,等.2000~2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应.生态学报 [J]. 2022,42(11):4524−4535.
Cao Y, Sun Y L, Chen Z X, et al. Dynamic changes of vegetation ecological quality in the Yellow River Basin and its response to extreme climate during 2000~2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42 (11):4524−4535.

[10] 方　贺,张育慧,何　月,等.浙江省植被生态质量时空变化及其驱动因素分析 [J]. 自然资源遥感, 2023,35(2):245−254.
Fang H, Zhang Y H, He Y, et al. Spatio-temporal variations of

vegetation ecological quality in Zhejiang Province and their driving factors [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,35(2):245-254.

[11] 康丽芳,赵锐锋,陆海天,等.近 20 年来气候变化和人类活动对石羊河流域植被生态质量变化影响的定量甄别 [J/OL]. 环境科学, 2024, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202404129.
Kang L, Zhao R, Lu H, et al. Quantitative Identification of the Impact of Climate Change and Human Activities on the Ecological Quality of Vegetation in the Shiyang River Basin over the Past 20 Years [J/OL]. 2024.Environmental Science. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202404129.

[12] Xia H, Wang W, Zhang Z. From Conservation to Development: A Study of Land Use and Ecological Changes to Vegetation Around the Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. Sustainability, 2025,17(6):2403.

[13] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneityp [J]. Ecological Indicators, 2016,67:250-256.

[14] Zhang Y, Zhang L, Wang J, et al. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu-Chongqing region, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 155,110978.

[15] 周美林,刘家宏,刘希胜,等.青海湖流域植被动态变化驱动力及空间粒度效应 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1497-1506.
Zhou M L, Liu J H, Liu X S, et al. Analysis of driving forces and spatial scale effects on vegetation dynamics in the Qinghai Lake Basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1497-1506.

[16] 孙治娟,谢世友.基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测 [J]. 生态学杂志, 2021,40(12):3836-3848.
Sun Z J, Xie S Y. Spatiotemporal variation in net primary productivity and factor detection in Yunnan Province based on geodetector [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(12):3836-3848.

[17] 孟 琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. 中国环境科学, 2021,41(2):826-836.
Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model—Take the Beijing-Tianjin sand source region as an example [J]. China Environmental Science, 2021,41(2):826-836.

[18] 李梦华,韩颖娟,赵 慧,等.基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析 [J]. 生态环境学报, 2022,31(7):1317-1325.
Li M H, Han Y J, Zhao H, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(7):1317-1325.

[19] Shi S, Wang X, Hu Z, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling [J]. Global Ecology and Conservation, 2023,42:e02398.

[20] 邹桃红,徐艳艳,陈 鹏,等.洞庭湖流域 2000~2021 年植被覆盖时空动态特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):961-971.
Zou T H, Xu Y Y, Chen P, et al. Spatiotemporal variations and their driving mechanism of vegetation coverage across Dongting Lake Basin from 2000 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):961-971.

[21] Yuan J, Xu Y, Xiang J, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its associated influence factor analysis in the Yangtze River Delta, eastern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26:32866-32879.

[22] 李星媚,严 军.基于 GEE 和 PLSR 的 2001~2020 年长三角地区植被覆盖时空变化及驱动力分析 [J]. 西北林学院学报, 2023,38(6):219-227.
Li X, Yan J. Spatiotemporal Variation and Driving Force Analysis of Vegetation Cover in the Yangtze River Delta Based on GEE and PLSR During 2001~2020 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(6):219-227.

[23] Yang Y, Yao L, Fu X, et al. Spatial and temporal variations of vegetation phenology and its response to land surface temperature in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. Forests, 2024,15(8): 1363.

[24] Yan H, Wang S, Billesbach D, et al. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants [J]. Ecological Modelling, 2015,297:42-59.

[25] 王晓蕾,石守海.基于 GEE 的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究 [J]. 地球信息科学学报, 2022,24(6):1087-1098.
Wang X L, Shi S H. Study on temporal and spatial changes of vegetation and topographic effects in the Yellow River basin based on GEE [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022,24(6):1087-1098.

[26] 高梦凡.长三角地区植被净初级生产力时空演变及其影响因素研究 [D]. 苏州:苏州大学, 2022.
Gao M F. Temporal and spatial evolution of net primary productivity and its influencing factors in the Yangtze River Delta [D]. Suzhou: Soochow University, 2022.

[27] Xu C G, McDowell N G, Fisher R A, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change [J]. Nature Climate Change, 2019,9(12):948-953.

[28] 张 蕾,钱 拴,曹 云,等.2022 年南方高温干旱特点及其对植被净初级生产力的影响 [J]. 生态学杂志, 2024,43(7):2182-2188.
Zhang L, Qian S, Cao Y et al. Characteristics of heat and drought events across southern China in 2022 and their impacts on vegetation net primary productivity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(7): 2182-2188.

[29] Wan L, Liu H, Gong H, et al. Effects of climate and land use changes on vegetation dynamics in the Yangtze River Delta, China based on abrupt change analysis [J]. Sustainability, 2020,12(5):1955.

[30] 徐立晨,邓 良,陈 俊,等.基于 GEE 长三角植被覆盖度时空变化及特征分析 [J]. 北京测绘, 2024,38(3):387-392.
Xu L, Deng L, Chen J, et al. Spatio-temporal variation and characteristics of fractional vegetation cover in Yangtze River Delta based on GEE [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2024,38(3): 387-392.

[31] 张淑怡,尤怡靖,朱泓恺,等.长三角地区植被覆盖演变城乡差异及其原因.生态学报, 2023,43(14):5980-5993.
Zhang S, You Y, Zhu H, et al. Urban and rural differences in vegetation cover evolution and its causes in the Yangtze River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(14):5980-5993.

[32] Yan J, Li G, Qi G, et al. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecotone in China based on terrain gradients [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2021,27(8):2124−2141.

[33] Zhang X, Ning J. Patterns, Trends, and Causes of Vegetation Change in the Three Rivers Headwaters Region [J]. Land, 2023,12(6):1127.

[34] 叶许春,杨晓霞,刘福红,等.长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子 [J]. 生态学报, 2021,41(17):6949−6959.
Ye X C, Yang X X, Liu F H, et al. Spatio-temporal variations of land vegetation gross primary production in the Yangtze river basin and correlation with meteorological factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6949−6959.

[35] 崔浩楠,罗海江,张学珍.1982~2019 年长江经济带植被覆盖变化的时空特征 [J]. 生态学杂志, 2021,40(8):2517−2529.
Cui H, Luo H J, Zhang X Z. Temporal and spatial characteristics of green vegetation cover changes in the Yangtze River Economic Belt from 1982 to 2019 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(8):2517−2529.

[36] 陈澍祺,何　玲,闫　丰.京津冀植被覆盖度时空演变及其对自然人为变化的响应 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3931−3944.
Chen S Q, He L, Yan F, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage in Beijing-Tianjin-Hebei and its response to natural anthropogenic changes [J]. China Environment Science, 2024,44(7):3931−3944.

[37] Cao Y, Wang Y, Li G, et al. Vegetation response to urban landscape spatial pattern change in the Yangtze River Delta, China [J]. Sustainability, 2019,12(1):68.

[38] Yang H, Zhong X, Deng S, et al. Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River basin, China [J]. Catena, 2021,206:105542.

[39] Wu S, Zhou S, Chen D, et al. Determining the contributions of urbanization and climate change to NPP variations over the last decade in the Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2014,472:397-406.

[40] Wang T, Gao M, Fu Q, et al. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Yangtze River Delta Region, China [J]. Land, 2024,13(4):440.

[41] Trujillo E, Molotch N P, Goulden M L, et al. Elevation-dependent influence of snow accumulation on forest greening [J]. Nature Geoscience, 2012,5(10):705−709.

[42] 陶　帅,邝婷婷,彭文甫,等,2000~2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例 [J]. 生态学报, 2020,40(14):5029−5043.
Tao S, Guang T, Peng W, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: A case study of Yibin City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(14):5029−5043.

[43] Wang J, Fan Y, Yang Y, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and driving force analysis of NDVI in the Minjiang River Basin, China, from 2001 to 2020 [J]. Water, 2022,14(18):2923.

[44] 王晓蕾,石守海,陈江朝霞.黄河流域植被覆盖度变化及驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2022,42(1):5358−5368.
Wang X, Shi S, Chen J. Change and driving factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin [J]. Chian Environmental Science, 2022,42(1):5358−5368.

[45] 刘珞丹,李　晶,柳彩霞,等 2000~2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 [J]. 水土保持研究, 2021,28:330−336,347.
Liu L, Li J, Liu C, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(6):330−336,347.

[46] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应 [J]. 长江流域资源与环境, 2020,29(1):66−78.
Deng Y J, Yao S B, Hou M Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its topographic differentiation effect in the middle and upper reaches of the Yangtze River basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(1):66−78.

[47] 张　亮,丁明军,张华敏,等.1982~2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析 [J]. 自然资源学报, 2018,33(12):2084−2097.
Zhang L, Ding M J, Zhang H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982~2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(12):2084−2097.

作者简介：方　贺(1990−),男,江苏徐州人,高级工程师,博士,主要从事生态遥感研究.发表论文 30 余篇.fanghe_doc@163.com