

方佳倩, 范瑜越, 方贺, 等. 金华市近 20 年植被生态质量变化特征及空间分异驱动力分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 51-63. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.005

FANG Jiaqian, FAN Yuyue, FANG He, et al. Analysis of characteristics of vegetation ecological quality changes in recent 20 years and driving forces of spatial variability in Jinhua City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 51-63. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.005

金华市近 20 年植被生态质量变化特征 及空间分异驱动力分析

方佳倩¹, 范瑜越¹, 方贺², 李正泉², 石守海³, 叶妍婷¹, 韩芙蓉¹

(1. 金华市气象局, 浙江 金华 321000; 2. 浙江省气候中心, 浙江 杭州 310051;
3. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要:【目的】探究金华市近 20 年来植被生态质量的时空变化特征, 并分析其空间分布的驱动因素, 以为金华市植被生态系统动态变化研究及植被资源保护提供重要的理论支撑。【方法】基于气象卫星遥感数据, 利用一元线性回归和地理探测器模型等方法, 开展金华市近 20 年植被生态质量的分析研究。【结果】金华市植被生态质量近 20 年来持续向好发展。植被覆盖度显著增加, 平均植被覆盖度由 2003 年 56.3% 增加至 2022 年 65.4%; 植被净初级生产力平均每年增加 $4.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$; 90% 以上区域植被生态质量指数 (VEQI) 一直在持续向好发展。其中土地利用、高程、地貌类型和夜间灯光这四个因子对金华市 VEQI 空间分异的影响力较大, 2020 年夜间灯光的单因子解释最强, 且与自然环境因子的交互作用解释力更强, 同时夜间灯光和其他所有因素之间都存在显著差异。【结论】气候、地表和人类活动之间的相互作用以非线性方式影响植被生长, 其中人类活动对 VEQI 空间分异格局具有显著影响力。

关键词: 生态; 遥感; 植被; 地理探测器; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0051-13



与作者互动
昕清·聊科研

Analysis of characteristics of vegetation ecological quality changes in recent 20 years and driving forces of spatial variability in Jinhua City

FANG Jiaqian¹, FAN Yuyue¹, FANG He², LI Zhengquan², SHI Shouhai³, YE Yanting¹, HAN Furong¹

(1. Meteorological Bureau of Jinhua City, Jinhua 321000, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310051, Zhejiang, China; 3. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China)

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-01-09; 录用日期: 2025-01-10; 网络出版日期: 2025-03-07

基金项目: 浙江省自然科学基金(LZJM23D050001); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C03190); 浙江省气象局科技计划项目(2021YB07, 2023ZDZL05, 2024ZD09); 金华市科学技术协会学术研究项目(2024-18); 国家自然科学基金(42305153); 中国气象局青年创新团队项目(CMA2023QN12)

作者简介: 方佳倩(1995—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事旅游气象和植被生态遥感研究。E-mail: fangjiaqian_0320@qq.com

通信作者: 方贺(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事植被和海洋生态遥感研究。E-mail: fanghe_doc@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] To explore the spatial and temporal variation characteristics of vegetation ecological quality in Jinhua City in the past 20 years, and to analyze the driving factors of its spatial distribution, in order to provide important theoretical support for the study of dynamic changes of vegetation ecosystem and the protection of vegetation resources in Jinhua City. [Methods] Based on meteorological satellite remote sensing data, the vegetation ecological quality of Jinhua City in the past 20 years was analyzed and studied by using linear regression and geographical detector. [Results] The vegetation ecological quality in Jinhua City has continued to improve over the past 20 years. The vegetation coverage has significantly increased, with the average vegetation coverage increasing from 56.3% in 2003 to 65.4% in 2022; The net primary productivity of vegetation has increased by an average of $4.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ annually; More than 90% of the areas have shown continuous improvement in the Vegetation Ecological Quality Index (VEQI). The four factors of land use, elevation, landform type, and nighttime lighting have a significant impact on the spatial differentiation of VEQI in Jinhua City. The single-factor explanation of night lighting in 2020 is the strongest, and its interaction with natural environmental factors has a stronger explanatory power. Meanwhile, there are significant differences between night lighting and all other factors. [Conclusion] The interaction between climate, surface, and human activities affects vegetation growth in a nonlinear manner, and human activities have a significant impact on the spatial differentiation pattern of VEQI.

Keywords: ecology; remote sensing; vegetation; geographical detector; influencing factors

0 引言

在陆地自然生态系统中, 植被占据着至关重要的位置, 通过光合作用在物质循环、能量流动和信息传递中发挥着重要作用^[1], 因此地面植被是生态系统健康和土地退化的敏感指标^[2-3]。近 20 年来, 气候背景发生明显变化, 人类活动加剧, 植被生长受到了显著影响, 陆地生态系统的健康和环境承载力也在发生改变^[4-5]。因此在新时代生态文明建设要求下, 研究区域植被时空变化及其对自然环境和人类活动变化的响应非常重要^[6-9]。

为了研究植被变化趋势, 基于遥感数据的植被覆盖度 (FVC) 和净初级生产力 (NPP) 得到广泛应用^[10-11]。例如, 李登科等^[12]通过对陕西省 18 年间植被覆盖度的研究说明了退耕还林等生态建设工程的实施对植被恢复和生长具有重要的促进作用; 张德铨等^[13]通过研究植被 NPP 发现青藏高原高寒草地生态系统健康状况总体改善局部恶化。然而, 单一特征量只能反映植被生态质量的一个方面, 即生产能力或覆盖能力。钱拴等^[14]采用中国地区的 MODIS 月 NDVI 数据与气象实况观测资料反演出 FVC 和 NPP, 并以此为基础构建了植被生态质量指数 (VEQI) 模型, 用以综合反映植被生态质量状况。

近年来, 学者们展开了对植被空间分异驱动机制的一系列研究, 例如, 赵丽红等分析南昌市 FVC 时空演变特征, 结果显示 FVC 变化是地形与土地利用综合作用的结果^[3]。陈福军等发现 NPP 年总累积量与年均温、年降水量存在显著相关关系, 且不同气候

条件的地区呈现的相关关系各有不同^[15]。方贺等^[6]研究认为在浙江省 2000—2020 年间植被生态质量指数 (VEQI) 变化中, 人类活动为主要的驱动因素, 仅在浙江省西南部的少数地区, 气候因素占主导。可见, 植被变化是多种因素共同影响的结果, 包括但不限于气候变化、地形、土壤等环境因素以及人为因素的影响^[16-18]。并且植被生长对环境变化的响应并非遵循简单的线性关系, 而是一种更为复杂的非线性相互作用关系^[19-20]。此时, 传统的统计方法具有十分明显的局限性, 难以全面而准确地揭示因子间的动态关系, 特别是人类活动因素与气候变化之间的关系。地理探测器作为一种探测空间分异性和识别其驱动因子的方法, 其优点在于可以消除和忽略输入要素的多重共线性^[21-23], 可以用来解释复杂地理环境地区的植被变化的驱动因素, 尤其关于人类活动因素与其他因素之间的关系^[24-25]。

本文利用 EOS/MODIS 卫星遥感植被指数产品, 分析了金华市近 20 年植被生态要素的时空变化特征, 采用地理探测器对金华市植被生态质量指数 (VEQI) 的影响因子进行探测, 研究其对环境因子、气候变化和人类活动的响应, 以期对未来气候变化情景下金华市植被生态系统动态变化研究以及植被资源保护提供重要理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

金华市位于浙江省中部 ($28^{\circ}32' \text{N}$ — $29^{\circ}41' \text{N}$, $119^{\circ}14' \text{E}$ — $120^{\circ}46'30'' \text{E}$), 地处金衢盆地中东部,

地势南北高、中部低。金华市属于亚热带季风气候, 四季分明, 温暖湿润, 雨量充沛, 但时空分布不均匀。金华市全年平均气温 18.3 °C; 年平均降水量 1 512.6 mm, 降水季节分布不均衡, 冬季最少, 夏季最多; 年平均日照时数 1 580~1 760 h。从图 1(a) 可见, 金华市植被覆盖以森林和农业区为主, 属亚热带常绿阔叶林地带, 森林区域主要分布在浦江北部、婺城南部、武义和磐安以及各县市交界的较高海拔地区, 森林覆盖率达 61.86%, 农田区域主要分布在兰江、金华江和东阳江流域以及盆地地区。

1.2 数据源

1.2.1 MODIS 卫星资料

卫星遥感数据来源于 MODIS MOD13Q1, 其中的归一化植被指数 (NDVI) 产品是 NASA 网站上发布的数据产品, 该数据集空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d, 选取 2003—2022 年时间段, 采用最大合成法得到月度 NDVI 数据^[6]。进一步计算年度平均 NDVI 数据。

1.2.2 探测因子数据

本文选取 10 种自变量作为探测因子, 包含气象因素 (年平均气温、年降水量和年日照时数)、地形因素 (高程、土壤类型和地貌类型) 和人为因素 (土地利用、GDP、人口和夜间灯光)。为确保研究中所用空间分辨率和投影方式的一致性, 将所有数据均统一为 WGS_1984 坐标系, 并利用 ArcGIS 软件构建 1 km×1 km 的渔网, 对数据进行重采样。

高程数据属于 ASTER GDEM 数据产品, 空间分辨率为 30 m, 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)。

气象观测数据来源于金华市气象局, 由于近 20 年来区域气象站持续建设中, 故图 1(b) 展示了 2020 年全市国家站和区域站点分布。选取全市 8 个国家气象站和 300 余个区域气象站的观测资料, 计算得出 2010、2015 和 2020 年的年平均气温、年降水量和年日照时数。在 ArcGIS 平台下利用克里金插值法生成全市的网格数据作为整个研究区的气候年值, 空间分辨率约为 1 km。

土壤类型、地貌类型资料均来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率均为 1 km。

土地利用数据来自于中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC, <https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>), 该数据集是以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像作为主要信息源, 数据空间分辨率为 30 m。

2010 年和 2015 年 GDP 数据来源于中国 GDP 空间分布公里网格数据集 (<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=33>), 2020 年数据来自中国公里网格 GDP 数据集, 源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。由于在进行地理探测器分析之前会对探测因子进行重分类处理, 因此 GDP 数据集来源不同对分析结果的影响不大。

人口数据来自 LandScan 平台 (<https://landscan.ornl.gov/>) 的 1 km 精度的人口分布栅格数据集, 该数据集是运用 GIS 和遥感等创新方法建立的全球人口动态统计分析数据库。

夜间灯光数据来源于长江三角洲科学数据中心 (<http://geodata.nnu.edu.cn>), 空间分辨率为

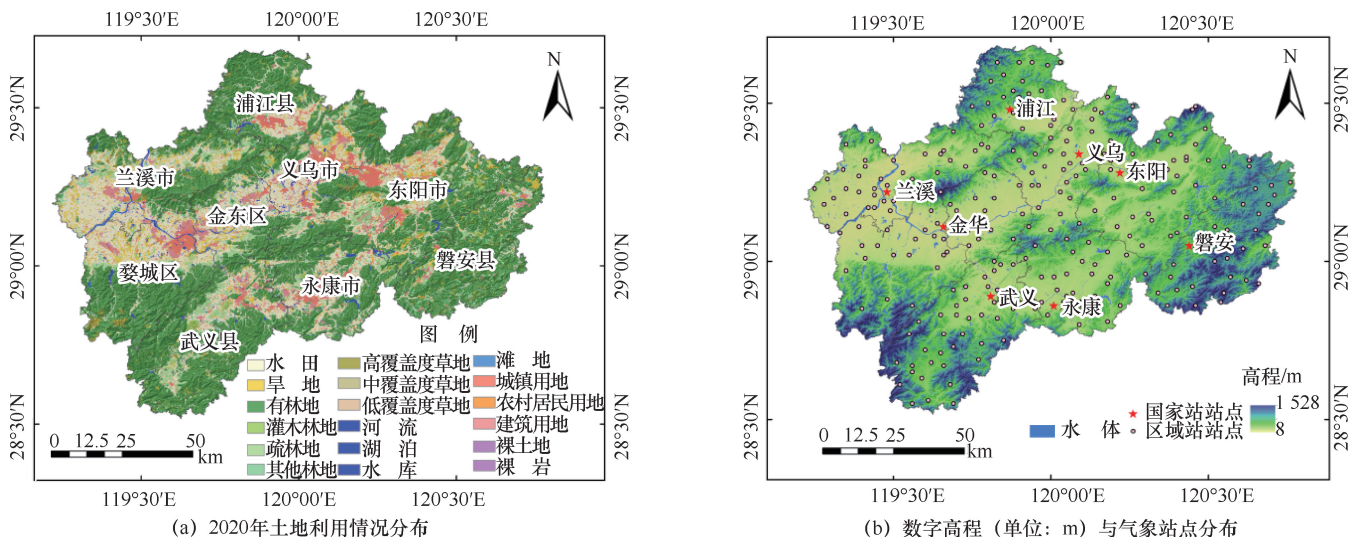


图 1 金华市研究区概况

Fig. 1 Overview of the area studied in Jinhua City

500 m。该数据集的参数属性同 NPP-VIIRS 夜间灯光数据一致, 且数据质量类似, 使得 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据无法同时使用的问题得到有效解决, 为研究提供了更全面的数据源支持。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度估算

本文采用 MODIS 的 $NDVI$ 合成数据, 运用混合像元分解法进行估算 FVC , 公式为

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖像元的 $NDVI$ 值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的 $NDVI$ 值。在本研究中, 针对我国的植被特征, 设定 $NDVI_{soil}$ 取值为 0.05, $NDVI_{veg}$ 取值为 0.95^[26]。全年绿色植被总体覆盖状况通过计算 12 个月的 FVC 并取其平均值来得出的。

1.3.2 植被净初级生产力遥感估算

本文使用的植被净初级生产力 (NPP) 数据是由中国气象局国家气象中心统一下发的合成产品。基于 MODIS $NDVI$ 遥感数据集和气温、降水等资料, 通过陆地生态系统碳通量 (TEC) 模型, 根据光能利用率理论估算的植被 NPP ^[27], 目前, 该植被 NPP 资料已在不同研究区植被生态评估中得到了很好的应用^[28-30]。计算公式为

$$NPP = GPP - R \quad (2)$$

$$GPP = \varepsilon \times T_e \times W_e \times FPAR \times PAR \quad (3)$$

式中, GPP 为总初级生产力; R 为植被通过呼吸作用消耗的部分; ε 为同时段最大光能利用率; T_e 和 W_e 分别为温度胁迫因子和水分胁迫因子; $FPAR$ 为植被吸收光合有效辐射的比例; PAR 为光合有效辐射。本文研究的累计 NPP 用每年 12 个月的累加值计算得出。

1.3.3 植被生态质量指数遥感估算

本文利用钱拴等^[14]的植被生态质量指数 ($VEQI$) 模型, 采用权重加权的方法, 来综合反映单位面积上植被的生态质量状况。 $VEQI$ 计算公式为

$$VEQI = 100 \times \left[f_1 \cdot FVC \cdot f_2 \left(\frac{NPP}{NPP_{max}} \right) \right] \quad (4)$$

式中, $VEQI$ 为当年该像元的植被综合生态质量指数, 其值在 0~100 之间; $VEQI$ 为 0, 说明植被覆盖度为 0, 植被 NPP 也为 0; $VEQI$ 为 100, 说明植被覆盖度为 100%, 植被 NPP 达历史最高; NPP_{max} 为全年植被 NPP 最高值; f_1 和 f_2 分别为陆地 FVC 和 NPP 的权重系数, 本文选用 $f_1=f_2=0.5$, 该权重系数在以往的植被 $VEQI$ 分布研究中应用良好^[31]。

1.3.4 植被生态要素趋势变化分析

本文采用一元线性回归分析方法, 斜率直接反映了植被生态要素随时间变化的趋势。计算公式为

$$k = \frac{t \sum_{m=1}^t (c_m Q_m) - Q_m \sum_{m=1}^t c_m}{t \sum_{m=1}^t c_m^2 - \left(\sum_{m=1}^t c_m \right)^2} \quad (5)$$

式中, $t=20$; Q_m 为 20 年内的第 m 年植被生态要素; c_m 为第 m 年年号; k 为观测年份内的植被生态要素 Q 随年份的变化趋势率, 即斜率。当斜率为正时 ($k>0$) 表明 Q 在观测年份内呈现出增长或改善趋势, 反之则表明呈下降趋势。

1.3.5 变异系数法

变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 作为评估长期观测序列数据变异程度的统计指标, 能够有效地揭示空间数据在时间维度上的变化差异性, 并实现对数据时间序列稳定性进行定量分析。若变异系数数值较高, 则表明数据的波动性较为显著; 反之, 则表明数据波动性较为平缓^[32]。变异系数的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VEQI_i - \overline{VEQI})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\overline{VEQI}} \quad (7)$$

式中, CV 表示变异系数; n 表示观测资料时间尺度; σ 为标准差; $VEQI_i$ 为第 i 年植被 $VEQI$ 的值; \overline{VEQI} 为 $VEQI$ 均值。

1.3.6 地理探测器

地理探测器是一种通过探测因变量空间分异性来揭示自变量对因变量驱动因子的统计学方法^[33]。地理探测器包括 4 个探测器: 分异及因子探测、交互作用探测、生态探测、风险区探测。

1.3.6.1 分异及因子探测

因子探测方法主要用来研究选取的各个因子对金华市植被生态质量指数 ($VEQI$) 解释力大小, 其计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中, q 为各因子对金华市 $VEQI$ 的解释力, 值域在 $[0, 1]$, 值越大, 说明该因子对 $VEQI$ 的解释力越强; $h=1, \dots, L$ 为探测因子的分层数; N_h 和 N 分

别表示各因子的 h 层和整个金华市的样本数; σ_h 和 σ 分别为 h 层和整个金华市 $VEQI$ 值的方差。

1.3.6.2 交互作用探测

交互作用探测器用于评估因子对 $VEQI$ 的影响时, 两个探测因子之间的相互作用效果。通过对比单因子 q 值及交互作用 q 值, 可判断因子间的交互作用类型, 共分为 5 类(见表 1)。

表 1 探测因子交互作用类型

Table 1 Interaction types of the detection factors

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

1.3.6.3 生态探测

生态探测以 F 统计量衡量, 探测驱动因子间对 $VEQI$ 空间分布的影响是否存在显著差异。计算公式为

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1} - 1)SSW_{X2}} \quad (9)$$

$$SSW_{X1} = \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2 \quad (10)$$

$$SSW_{X2} = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2 \quad (11)$$

式中, $L1$ 、 $L2$ 分别为 $X1$ 、 $X2$ 分层的数量; N_{X1} 、 N_{X2} 分别为二者样本数目; SSW_{X1} 、 SSW_{X2} 分别为由 $X1$ 和 $X2$ 形成的分层的层内方差之和。

1.3.6.4 风险区探测

用于探测各因子对 $VEQI$ 影响的类型或适宜范围, 用 t 统计量来检验

$$t_{\gamma_{h=1} - \gamma_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (12)$$

式中, \bar{Y}_h 为子区域 h 内的 $VEQI$ 均值; n_h 为子区域 h 内样本数量; Var 表示方差。统计量 t 近似地服从 $Student's t$ 分布, 其中自由度的计算方法为

$$df = \frac{\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}}{\frac{1}{n_{h=1} - 1} \left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} \right]^2 + \frac{1}{n_{h=2} - 1} \left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^2} \quad (13)$$

式中, 零假设 $H_0: \bar{Y}_{h=1} = \bar{Y}_{h=2}$, 如果在置信水平 α 下拒绝 H_0 , 则认为两个子区域间 $VEQI$ 均值存在明显差异。

2 植被要素时空变化分析

2.1 植被覆盖度时空变化

图 2 为 2003—2022 年金华市 $NDVI$ 和植被覆盖度 (FVC) 趋势变化, 由图 2 看出, 金华市植被 $NDVI$ 和 FVC 均展现出增长趋势, 且这两种指标的变化趋势保持了良好的同步性。近 20 年金华市植被 $NDVI$ 和 FVC 分别以 0.035 和 4.0% 每十年的速率增长。2022 年平均植被覆盖度为 65.4%, 较 2003 年 (56.3%) 增加了 9.1 个百分点, 较常年均值 (2003—2022 年, 本文下同) 增加 3.5%。2003—2022 年金华市 93% 以上区域的植被覆盖度呈增长趋势。由图 3 可见, 2022 年金华市海拔较高的山地区域 FVC 较 2003 年显著提升, 如婺城南部、东阳东部、浦江、武义和磐安等大部分山区。2022 年金华市 40% 以上区域的植被覆盖度达到了 70%, 较 2003 年涨幅达 2.7 倍, 森林“绿度”显著提升。而随着城市化进程加快, 城镇区域的植被覆盖度则有所降低, 如婺城东部、东阳中西部、永康中部、金东、义乌等。

2.2 植被净初级生产力时空变化

图 4 为 2003—2022 年金华市植被 NPP 变化趋势图, 研究表明金华市植被 NPP 呈波动上升趋势, 平

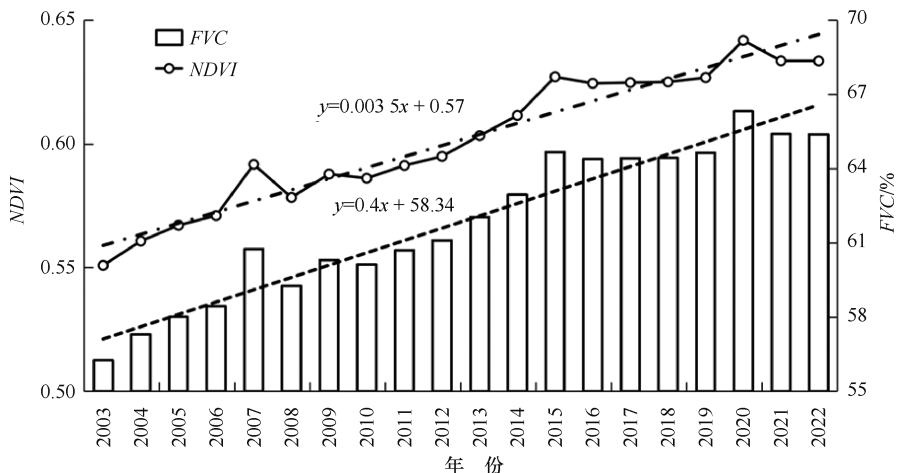
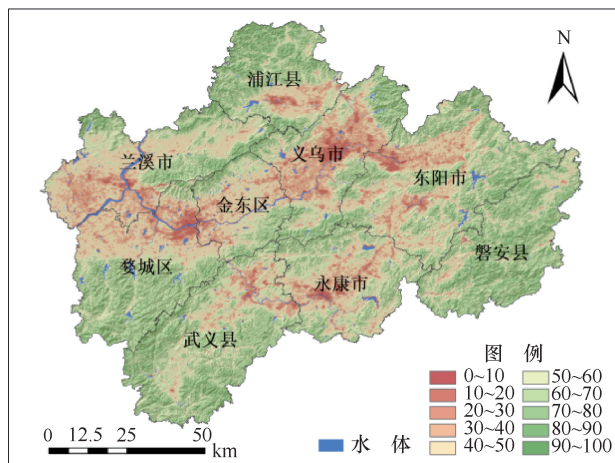
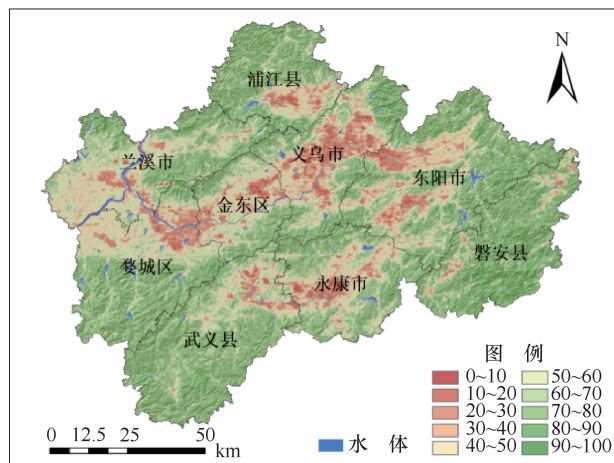


图 2 2003—2022 年金华市 $NDVI$ 和 FVC 趋势

Fig. 2 Variation of $NDVI$ and FVC in Jinhua City from 2003 to 2022



(a) 2003年



(b) 2022年

图 3 金华市植被覆盖度 (FVC) 空间分布 (单位: %)

Fig. 3 Map of FVC in Jinhua City (Unit: %)

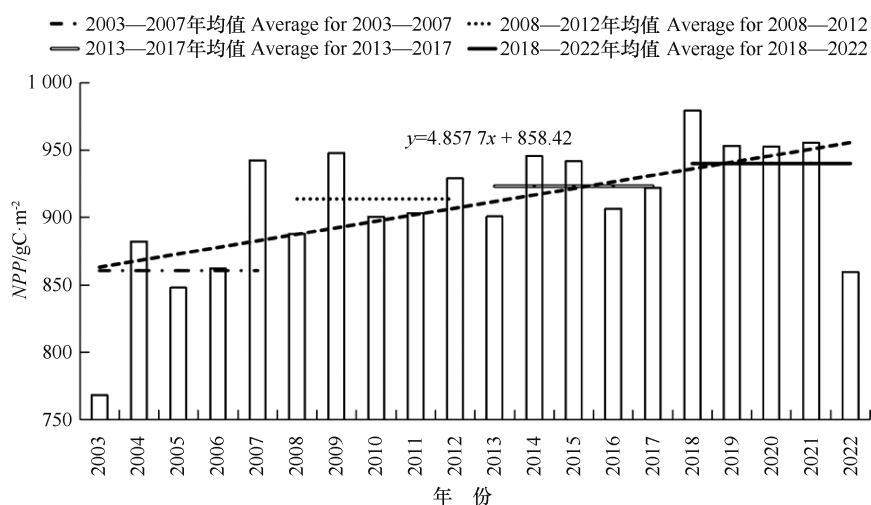


图 4 2003—2022 年金华市植被净初级生产力 (NPP) 变化趋势

Fig. 4 Chang trend of NPP in Jinhua City from 2003 to 2022

均每年增加 $4.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 植被通过光合作用固定二氧化碳、释放氧气的生态功能增强, 吸收二氧化碳量和释氧量分别每年增加 $17.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $12.7 \text{ gO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于 2022 年高温干旱等极端气候条件影响, 金华市植被 NPP 较常年均值偏低 5.5%。近 20 年间每五年植被净初级生产力均值分别为 $860.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $913.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $923.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $940.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 因此从长时间序列来看, 金华市植被生态系统服务功能仍然呈增强趋势。同时近 20 年来, 金华市约 87.9% 的区域植被 NPP 表现为不断增强。

图 5 为 2018—2022 年金华市植被 NPP 均值空间分布图, 分析可得这五年里金华市 65% 以上区域 NPP 均值达到 $800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中高值区主要位于海拔较高的山区, 如浦江北部、婺城南部、武义县和磐

安县等地, NPP 多在 $900 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上; 低值区主要分布在海拔较低的平坦地区, 如金华市主城区以及兰溪、义乌、东阳和永康等城区, NPP 多在 $500 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。由于城镇区域多为建筑用地, FVC 普遍较低, 周边又多为农业用地, 尽管存在植被, 但相较于自然生态区域, 其光能利用率相对较低。

此外, 从时序变化特征来看, 2003—2022 年间金华市耕地和林地地区植被 NPP 均呈现波动增长趋势 (见图 6), 分别表现为每年增加 $2.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 林区植被 NPP 均值较高且存在显著增长趋势。在 2019 年和 2022 年, 耕地和林地植被 NPP 出现显著下降, 这是由于当年金华市遭受重大气象灾害, 导致植被生长受限。2019 年春季出现连阴雨, 金华本站雨日 60 天, 雨量超七成。梅雨期间, 雨量较常年多 87.2%。同年, 台风“利奇马”导致金华东部和南部出现暴雨到大暴雨。2022 年遭遇历史罕见的极端高温, 40°C 以上高温日数 23 d, 极端气温 42.0°C , 均创历史新高。7 月至 11 月上旬降水量比常年同期偏少超六成, 大部分地区出现中度以上干旱, 农作物受旱严重。2022 年金华植被恢复状况良好, 植被 NPP 得到有效回升。NPP 达到 $800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上的耕地、林地分别占比为 30.9% 和 91.9%, 较 2003 年分别提高了 16.5% 和 12.0% (见图 7)。在这 20 年间金华市 90.6% 的林

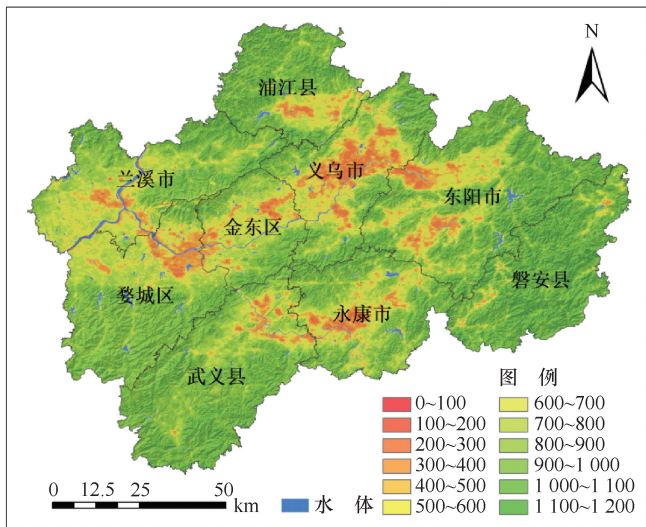


图 5 2018—2022 年金华市植被净初级生产力 (NPP) 均值空间分布 (单位: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 5 Average value spatial distribution of NPP in Jinhua City from 2018 to 2022 (Unit: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)

地区域和 59.8% 的耕地区域的植被 NPP 不断提高, 生态环境得到显著改善 (见图 8)。

2.3 植被生态质量指数时空变化

图 9 为 2003—2022 年金华市 VEQI 变化趋势图, 在近 20 年里金华市 VEQI 呈现出一种波动上升的趋势, 每五年 VEQI 均值分别为 59.8、62.8、64.8 和 66.2, 其中最大值为 2018 年的 67.2。近 20 年来, 金华市生态文明建设的进一步深化, 加之近些年气候水热条件有助于植被生存生长, 植被生态质量得到了大幅改善。2022 年受高温干旱极端天气影响, 金华市 VEQI 为 63.4, 较 2021 年下降了 5.1%。

从空间分布来看: 2022 年金华市山区植被生态质量总体好于盆地和平原区, 山区 VEQI 多在 70 以

上, 盆地和平原区多在 50 以下, 城区多在 40 以下 (见图 10 a)。近 20 年金华市 9 成以上区域植被生态质量一直在持续向好发展 [见图 10(b)]。不过由于城市化进程加快, 在部分区域 (多位于正在开发的区域) 植被生态质量呈减少趋势, 如金义都市区、婺城新区等。

据 2003—2022 年金华地区年际植被生态质量指数 (VEQI) 的分析结果, 本文还对研究区域进行了逐像素的变异系数空间分布计算, 并依据计算结果将植被稳定性划分为五个等级^[29]: 高波动变化 (>0.20)、较高波动变化 ($0.15 \sim 0.2$)、中等波动变化 ($0.10 \sim 0.15$)、较低波动变化 ($0.05 \sim 0.10$) 以及低波动变化 (<0.05)。如图 11 所示, 在研究时段内, 金华地区植被 VEQI 表现出低波动和较低波动状态的区域分别占总面积的 0.04% 和 58.43%, 这些区域广泛分布于金华山区; 中等波动变化区域的占比为 29.63%, 主要位于市区边缘地带; 较高波动和高波动状态的区域分别占 5.70% 和 6.20%, 主要分布在各县市 (除磐安外) 的中心城区。总体而言, 海拔较高的山区以林地为主, 人类活动强度较低, 导致植被 VEQI 的波动变化较弱; 而经济较为发达的城镇地区或者经济开发地区, 人类活动对植被 VEQI 的影响较大, 因此表现出较高的波动性变化。

3 植被生态质量指数的驱动力分析

3.1 不同因子对 VEQI 空间分异的探测分析

采用地理探测器, 选取高程 (X1)、年平均气温 (X2)、年降水量 (X3)、年日照时数 (X4)、土壤类型 (X5)、地貌类型 (X6)、土地利用 (X7)、GDP

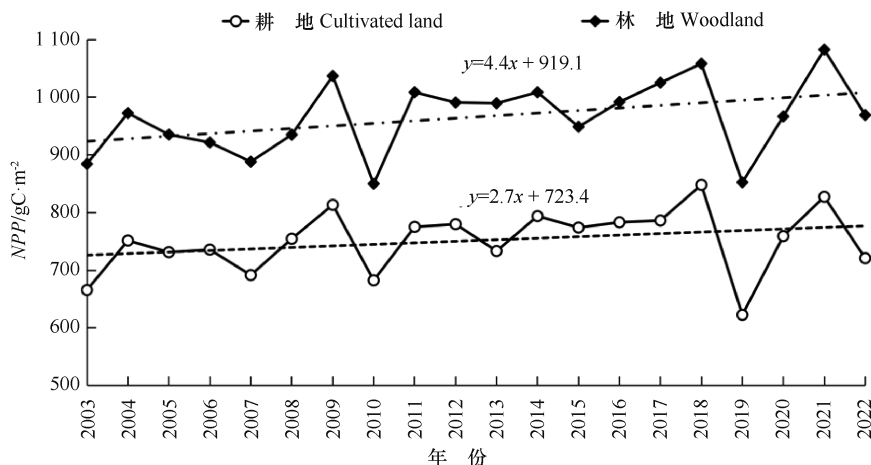
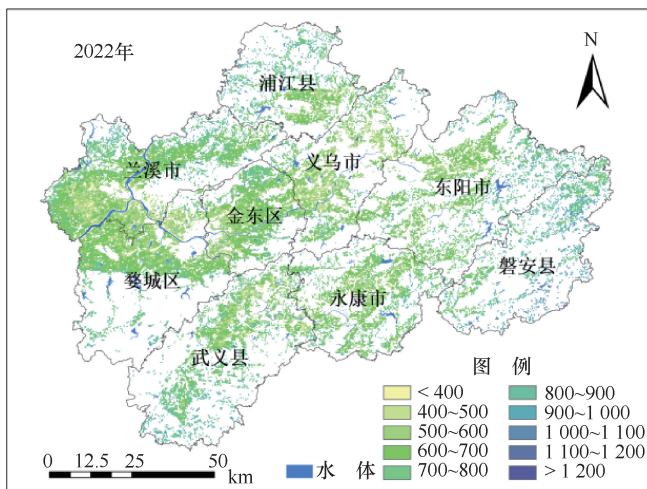
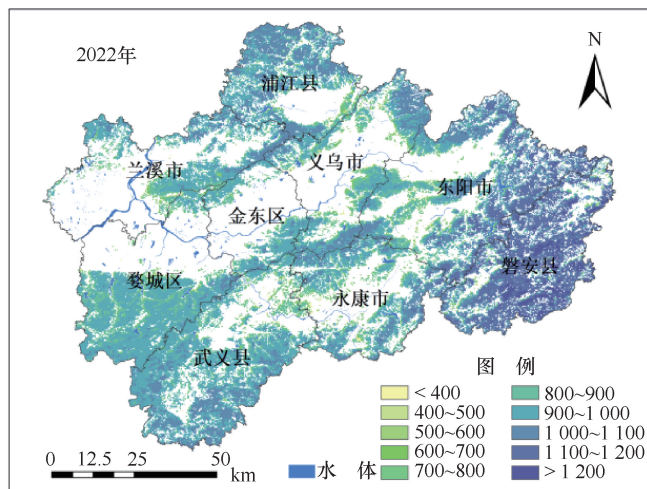


图 6 2003—2022 年金华市耕地、林地植被净初级生产力 (NPP) 的变化趋势

Fig. 6 Chang trend of NPP in cultivated and forested area in Jinhua City from 2003 to 2022



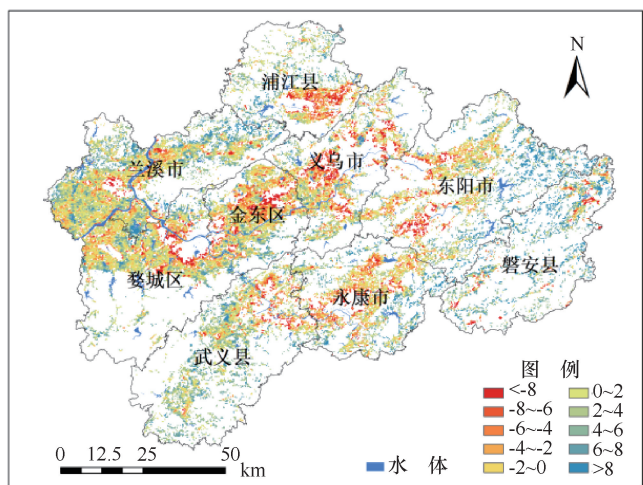
(a) 耕地



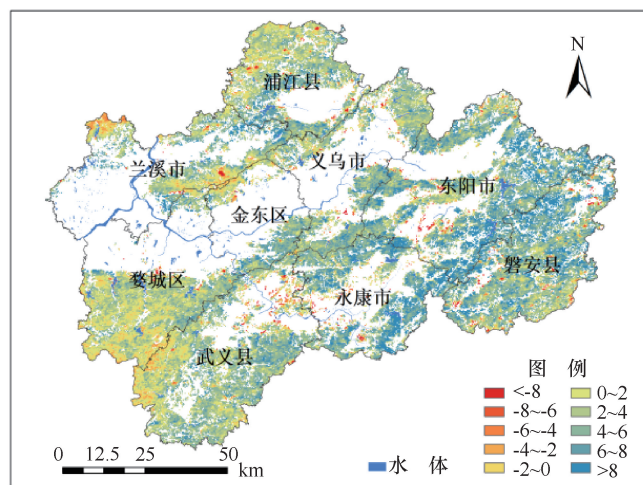
(b) 林地

图 7 金华市 2022 年植被净初级生产力 (NPP) 空间分布 (单位: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 7 Spatial distribution of NPP in Jinhua City in 2022 (Unit: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)



(a) 耕地



(b) 林地

图 8 2003—2022 年金华市植被净初级生产力 (NPP) 变化率空间分布 (单位: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 8 Variation trend spatial distribution of NPP in Jinhua City from 2003 to 2022 (Unit: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)

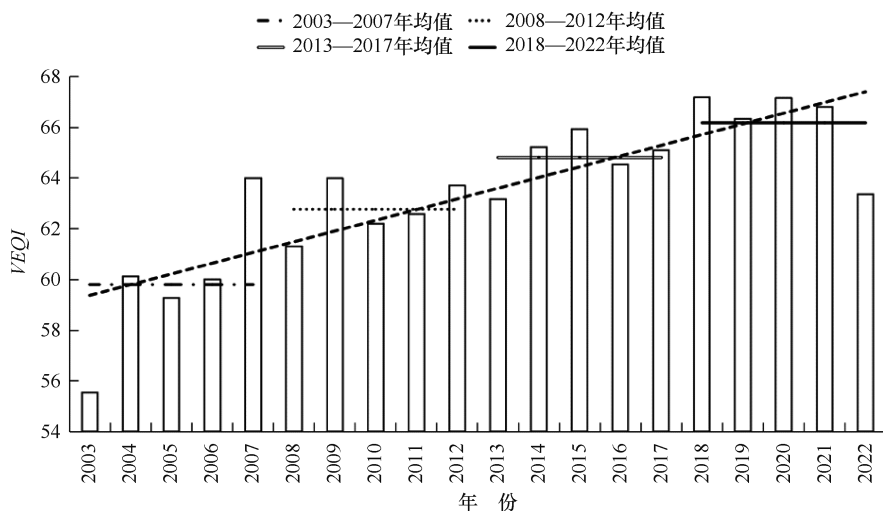
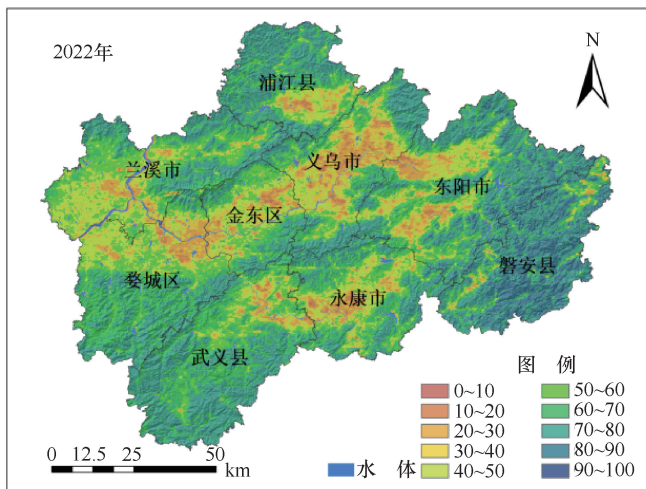
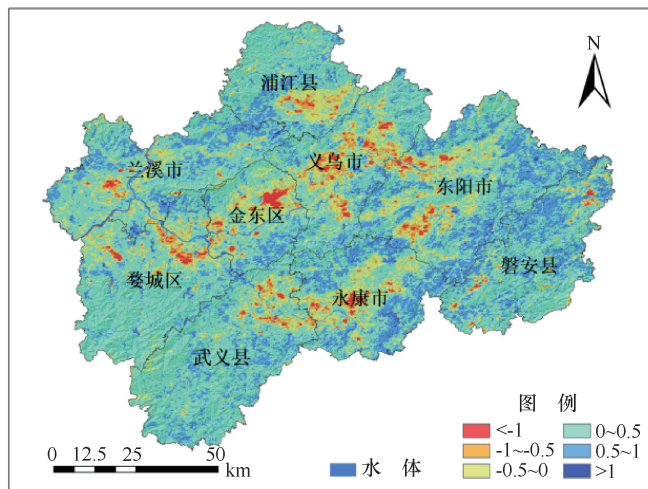


图 9 2003—2022 年金华市植被生态质量指数 (VEQI) 变化趋势

Fig. 9 Chang trend of VEQI in Jinhua City from 2003 to 2022



(a) 2022年植被生态质量指数 (VEQI) 空间分布



(b) 2003—2022年VEQI改善率空间分布

图 10 金华市植被生态质量指数 (VEQI) 及其改善率空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of VEQI and its improvement rate spatial distribution in Jinhua City

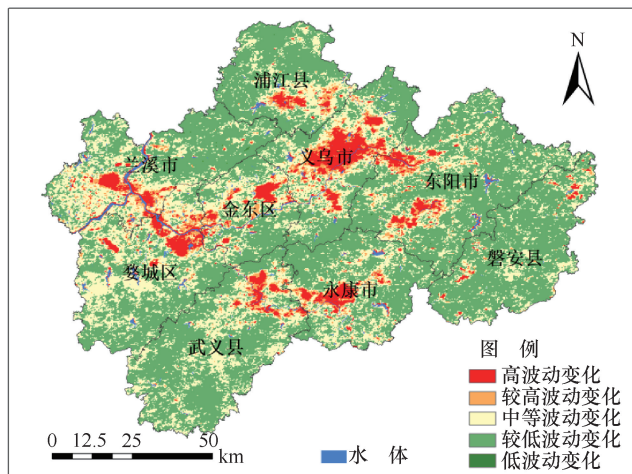


图 11 金华市植被生态质量指数 (VEQI) 变异系数空间分布

Fig. 11 Coefficient of variation of vegetation VEQI in Jinhua City

(X8)、人口 (X9) 和夜间灯光 (X10) 10 个探测因子对 2020 年金华 VEQI 的空间分异进行分析。表 2 为 2020 年 VEQI 值空间分析解释力 q 值指标, 从因子解释力排序来看, 对 VEQI 影响较大的因子为土地利用、高程、地貌类型和夜间灯光, 它们可以被认为是主要的驱动力。整体上, 地形地貌因子对 VEQI 值的解释力较大, 日照时数、降水和气温等气候因子对 VEQI 值的解释力较小。

表 2 VEQI 空间分异的因子检测分析结果

Table 2 Results of factor detection analysis with VEQI spatial differentiation

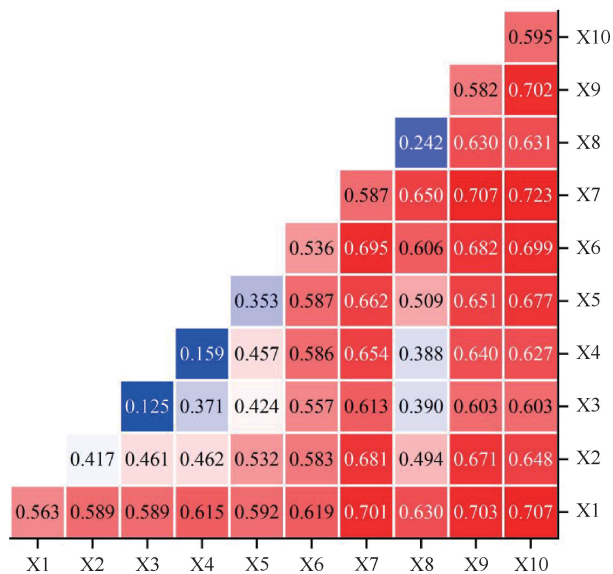
	高 程	年平均气温	年降水量	年日照时数	土壤类型	地貌类型	土地利用	GDP	人 口	夜间灯光
q 值	0.563	0.417	0.125	0.159	0.353	0.536	0.587	0.242	0.582	0.595
p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.2 交互作用探测分析

绝大多数因子交互作用显著增强, 表现为两因子共同作用的 q 值大于单因子作用时的 q 值。通过交互作用探测结果可知, 其中 $X7 \cap X10 (0.723) > X1 \cap X10 (0.707) > X7 \cap X9 (0.707) > X1 \cap X9 (0.703) > X9 \cap X10 (0.702)$ 交互作用影响力排名前五 (见图 12), 土地利用与夜间灯光因子交互作用最强。在单因子解释力里, 夜间灯光、土地利用和人口代表的人类活动因子最高, 且与自然环境因子的交互作用更强。其中夜光指数是人类活动的直接表征, 人口的增长能够间接改变土地利用模式, 城市扩张造成生态用地转化为建设用地, 进而导致植被生态质量的明显下降。因此 2020 年人类活动因素成为影响 VEQI 空间分异格局的主导因素, 而以年平均气温、年降水量、年日照时数为代表的气候因子的影响力相较之下偏弱, 这与方贺等^[5]的研究结果基本一致。

3.3 生态探测分析

除了相互作用分析外, 还需要进行生态探测, 分析这些因子对 VEQI 空间分异的影响是否存在显著差异。生态探测结果如表 3 所示。研究结果揭示, 年降水量、年日照时数、土壤类型、地貌类型、土地利用、人口、夜间灯光均和其他因子之间对 VEQI 空间



蓝色到红色渐变过程表示交互作用由弱到强

图 12 探测因子交互作用探测影响力

Fig. 12 Interactive detection explanatory power of various factors

分异的影响力存在显著差异, 尤其是夜间灯光的影响力和其他所有因素之间都存在显著差异。夜间灯光作为一个独立变量, 对 VEQI 的空间分布具有显著的解释力, 表明夜间灯光所反映的人类活动因素在植被生态质量空间格局形成中具有显著的影响力。另外, 高程、年平均气温、GDP 和大部分其他因子对 VEQI 影响之间无显著性差异。

表 3 生态探测结果

Table 3 Ecological detection results

驱动因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X2	N								
X3	N	N							
X4	N	N	Y						
X5	N	N	Y	Y					
X6	N	Y	Y	Y	Y				
X7	Y	Y	Y	Y	Y	Y			
X8	N	N	Y	Y	N	N	N		
X9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	
X10	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y

注: 采用显著性水平为 0.05 的 F 检验, “Y” 表示两因子对 VEQI 影响存在显著性差异, “N” 表示无显著性差异。

3.4 风险区探测分析

图 13 显示了不同探测因子对植被生态质量指数 (VEQI) 空间分异的影响。气候因子对 VEQI 具有调节作用。例如, 温度的影响在不同程度上是不同的。2020 年, 在第 2 类 (15.4~15.9 °C) 区域中 VEQI 达到峰值 71.7, 气温较高的区域, 植物生长受到抑制, VEQI 值明显偏低。降水和日照则呈现不同的分异规

律, 降水越充足的区域, 植被生态质量越优; VEQI 在光照条件最优的第 10 类 (1 556.2~1 606.8 h) 达到 73.6。

高程也表现出与温度相似的影响模式。高程在 656~784 m (第 8 类) 是植被生长最适宜范围, VEQI 值达到峰值 71.9, 高于 784 m 或低于 656 m 时, VEQI 值都将有所下降。同时, 地貌类型为大起伏中山的区域 VEQI 值最高。不同土壤类型的 VEQI 明显不同, 其中黄壤的 VEQI 值明显高于其他土壤, 达到 70.9。

此外, 不同类型的土地利用/土地覆盖对 VEQI 空间分异的影响也不同。总体来看, 有林地、灌木林和低、中、高草地覆盖保持了较高的植被生态质量水平。2020 年人类活动对植被的影响也十分显著, 相对而言在经济不发达、人口分布稀疏的地区植被生长最为显著, 植被生态质量优异。

4 结论和讨论

本文基于气象卫星遥感数据, 对金华市近 20 年植被生态要素进行了时空变化研究, 并采用地理探测器模型分析了自然因子和人为因子对植被生态质量指数 (VEQI) 空间分异的驱动作用。得到以下结论:

(1) 2003—2022 年金华市植被 NDVI 和 FVC 显著增加, 平均 FVC 由 2003 年 56.3% 增加至 2022 年 65.4%; 植被 NPP 年均增长 4.9 gC · m⁻², 其中耕地和林地的 NPP 均呈现波动增长趋势, 90.6% 林地区域和 59.8% 耕地区域的 NPP 显著提升; 金华市 90% 以上区域植被生态质量呈现明显改善的趋势, 但在部分城镇区域 VEQI 呈下降趋势。

(2) 金华市 VEQI 的空间分异受气候、地表和人类活动等因素共同作用, 土地利用、高程、地貌类型和夜间灯光这 4 个因子对 VEQI 值的影响力较大, 气候因子的影响力较小。

(3) 气候、地表和人类活动之间的相互作用以非线性方式影响植被生长, 2020 年夜间灯光的单因子解释最强, 且与自然环境因子交互作用解释力更强, 生态探测也表明, 夜间灯光和其他所有因素对 VEQI 空间分异的影响力都存在显著差异, 可见人类活动是影响 VEQI 空间分异格局的主导因素。此外, 社会经济发展水平较高的区域通常不利于植被的自然增长, 因此亟需加强生态保护措施。

本研究所得结论尚属初步阶段, 仍存在着以下不足之处。首先, VEQI 的有效性存在一定的局限性,

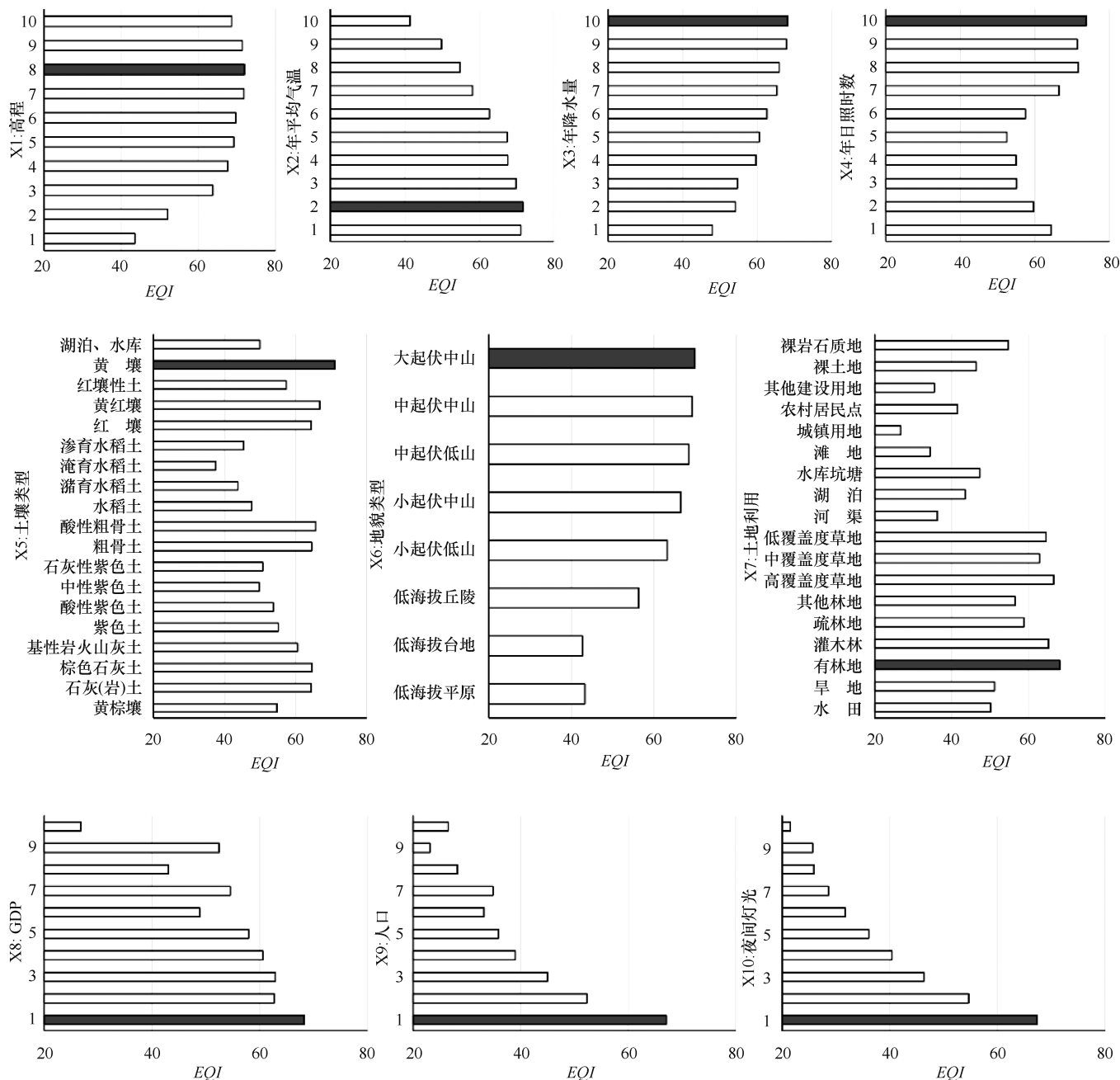


图 13 不同影响因子的适宜类型或范围

Fig. 13 Suitable ranges or types of detection indicators

其计算方法亦需进一步完善。尽管 $VEQI$ 作为植被敏感性指标的乘积，能够一定程度上定量表达植被综合生态质量的高低以及年际之间对比、多年变化趋势，但实际影响植被生态质量的还有其他因素，如植物多样性等。然而，植物多样性变化的实时监测目前仍面临挑战。在后续研究中，在能够实时获取植物多样性数据的情况下，应考虑对 $VEQI$ 模型进行优化。另外，本研究揭示了人类活动对金华市植被生态影响的显著性，而气候条件的影响则不甚明显。但实际上对于特定年份的极端事件，如 2022 年复合干旱热浪对

植被的影响，其具体作用机制尚不明朗，这也是后续研究亟待深入探讨的课题。

参考文献 (References):

[1] PIAO S L, WANG X H, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.

[2] 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*, 2022, 38(22): 63-72.
- [3] 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志, 等. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3723-3733. ZHAO L H, WANG P, OUYANG X Z, et al. An analysis of the spatio-temporal variation in fractional vegetation cover and its relationship with non-climate factors in Nanchang City, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3723-3733.
- [4] ZHANG K, LYU Y H, FU B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75: 949-960.
- [5] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(12): 1-8. WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(12): 1-8.
- [6] 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.
- [7] DUBOVYK O, LANDMANN T, DIETZ A, et al. Quantifying the impacts of environmental factors on vegetataion dynamics over climatic and management gradients over Central Asia[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 600.
- [8] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1): 1-10. LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
- [9] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 1-11. LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [10] 史冲. 植被指数在植被覆盖度测算中的应用[J]. *北京测绘*, 2014, 28(2): 94-97. SHI C. The application of vegetation indices in vegetation coverage index[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2014, 28(2): 94-97.
- [11] 赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于 HASM 的中国植被 NPP 时空变化特征及其与气候的关系[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 215-225. ZHAO M M, LIU Y, YANG J L, et al. Spatio-temporal patterns of NPP and its relations to climate in China based on HASM [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2): 215-225.
- [12] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 1-10. LI D K, WANG Z. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 1-10.
- [13] ZHANG Y L, QI W, ZHOU C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982 to 2009[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 269-287.
- [14] 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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6573-6583.
- [15] 陈福军, 沈彦俊, 李倩, 等. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J]. *地理科学*, 2011, 31(11): 1409-1414. CHEN F J, SHEN Y J, LI Q, et al. Spatio-temporal variation analysis of ecological systems NPP in China in past 30 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(11): 1409-1414.
- [16] SEDDON A W R, MACIAS-FAURIA M, LONG P R, et al. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. *Nature*, 2016, 531: 229-232.
- [17] HOLSINGER L, PARKS S A, PARISIEN M, et al. Climate change likely to reshape vegetation in North America's largest protected areas [J]. *Conservation Science and Practice*, 2019, 1(7): e50.
- [18] LIU H Y, JIAO F S, YIN J Q, et al. Nonlinear relationship of vegetation greening with nature and human factors and its forecast-A case study of Southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106009.
- [19] HEIN L, DE RIDDER N, HIERNAUX P, et al. Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images-ScienceDirect [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(11): 1164-1172.
- [20] ZHENG J Y, FANG X Q, WU S H. Recent progress of climate change research in physical geography studies from China [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37: 16-27.
- [21] PENG W F, KUANG T T, TAO S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, Western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [22] DING Y T, ZHANG M, QIAN X Y, et al. Using the geographical detector technique to explore the impact of socioeconomic factors on PM2.5 concentrations in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211(FEB. 20): 1480-1490.
- [23] ZHU L J, MENG J J, ZHU L K. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117(2): 106545.
- [24] ZHANG X M, YUE Y M, TONG X W, et al. Eco-engineering controls vegetation trends in Southwest China karst [J]. *Science of*

- The Total Environment, 2021, 770: 145160.
- [25] MENG X Y, GAO X, LI S Y, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982—2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 603.
- [26] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30.
- ZHOU W, GANG C C, LI J L, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15-30.
- [27] YAN H, WANG S Q, 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.
- [28] 周媛, 曹云, 钱悦, 等. 2000—2022 年江西省生态系统调节服务功能演变特征及气象影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(8): 2187-2196.
- ZHOU Y, CAO Y, QIAN Y, et al. Evolution characteristics and meteorological impacts of ecosystem regulation service functions in Jiangxi Province, China from 2000 to 2022[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(8): 2187-2196.
- [29] 方贺, 樊高峰, 王阔, 等. 2000—2022 年长江三角洲地区植被净初级生产力时空演化特征及驱动因素[J/OL]. 环境科学, 1-17. [2024-10-20]. <http://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408215>.
- FANG H, FAN G F, WANG K, et al. Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Factors of Vegetation NPP in the Yangtze River Delta from 2000 to 2022[J/OL]. Environmental Science, 1-17. [2024-10-20]. <http://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408215>.
- [30] 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.
- [31] 李洪伟. 浙江省植被覆盖的时空变化研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
- LI H W. Study on the Spatial-Temporal Change of Vegetation in Zhejiang Province[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010.
- [32] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
- YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

(责任编辑 王海锋)