

doi: 10.6046/zrzyyg.2022070

引用格式: 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.)

浙江省植被生态质量时空变化及其驱动因素分析

方 贺¹, 张育慧¹, 何 月¹, 李正泉¹, 樊高峰¹, 徐 栋², 张春阳³, 贺忠华¹
(1. 浙江省气候中心,杭州 310051; 2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室,北京 100875; 3. 衢州市气象台,衢州 324000)

摘要: 浙江省是“两山”理论的发源地,同时也是我国第一个生态省,研究该区域植被生态质量状况对生态文明建设具有重要的参考价值。该文结合多源遥感数据与气象观测资料,探究了浙江省 2000—2020 年植被生态质量的时空变化及其对气候因子与人类活动的响应。结果表明:①2000—2020 年,浙江省净初级生产力(net primary productivity,NPP)和植被覆盖度(fractional vegetation cover,FVC)呈上升趋势,植被“绿度”显著提升;②2000—2020 年,浙江省植被生态环境质量呈波动上升趋势,且山地区域的植被生态质量指数(vegetation ecological quality index,VEQI)明显高于盆地和平原地区;③浙江省 2000—2020 年间 VEQI 变化的主导驱动因素是人类活动,仅在浙江省西南小部分区域气候因子占据主导因素。研究结果加深了对浙江省植被生态质量时空变化及其驱动因素的认识,对浙江省甚至全国其他地区的生态文明建设具有重要意义。

关键词: 生态; 遥感; 净初级生产力; 植被; MODIS

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0245-10

0 引言

21 世纪以来,全球植被绿化程度明显,且中国对其贡献了近 25%^[1]。中国的植被绿化得益于东部地区农田和森林植被的持续增长^[2-3]。植被生态质量是维护陆地生态系统稳定的基础。植被不仅参与陆地表面的能量交换、生物地球化学循环和水循环过程,也能反映某一地区人类活动的变化。伴随着气候条件变化和人类活动加剧的共同影响,不同时期的植被生态质量势必受到影响,从而导致年际间植被生长状况变化较大^[4]。浙江省地处中国东南沿海、长江三角洲南翼,全省土地覆盖以森林和农田为主,森林覆盖率达 61.15%。因此,探究浙江省植被生态质量的时空变化规律及其对气候因子与人类活动的响应对地区的生态文明建设具有重要意义^[5]。

净初级生产力(net primary productivity,NPP)和

植被覆盖度(fractional vegetation cover,FVC)作为反映陆地生态系统服务功能的 2 个最基本特征量,同时也是表达植被生态质量和植物生长状况的两个关键参数^[6-7]。其中,植被 NPP 作为陆表碳循环的重要组成部分,不仅是调节生态过程和判定生态系统碳汇/源的重要因子,也直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力^[8]。目前,植被 NPP 的研究已经取得了长足的发展。从早期的站点观测逐步发展到大范围甚至全球尺度的模型估算,其中结合遥感卫星资料和气象观测数据共同反演植被 NPP 已经成为获取大尺度范围植被 NPP 的主要方法^[9-10]。其次,植被覆盖度是反映陆地生态系统状态的另一个重要参数,其测量方法主要分为地面测量法和遥感反演法,其中遥感反演法具有空间连续、监测范围广、经济成本低等优点,广泛应用于大范围植被覆盖度的监测^[11-13]。

近年来,学者们结合植被 NPP、植被覆盖度与气象观测数据,提出了众多用于综合评价植被生态质

收稿日期: 2022-03-03; 修订日期: 2022-11-21

基金项目: 浙江省气象局科技项目“高分系列卫星遥感影像处理及业务化应用研究”(编号: 2021YB07)、浙江省气象局科技项目“浙江近海赤潮与金潮遥感识别及其暴发气象驱动模型构建”(编号: 2022ZD06)、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划“重大自然灾害监测预警与风险防控技术、装备研发及应用示范-浙江省森林火灾动态监测预警和风险防控关键技术研究与应用示范”(编号: 2023C03190)、浙江省自然科学基金项目“东海近海多源 SAR 影像风场反演及风能资源评估”(编号: LQ21D060001)及中国气象局卫星专项项目“山地生态气象遥感应用系统”(编号: FY-3(03)-AS-12.13)共同资助。

第一作者: 方 贺,男(1990-),博士,高级工程师,研究方向为植被和海洋生态遥感。Email: fanghe_doc@163.com。

通信作者: 何 月,女(1981-),硕士,高级工程师,研究方向为城市和植被生态遥感。Email: heyue0925@163.com。

量状况的模型。例如,毛留喜和钱栓等^[14-16]利用植被 NPP 构建了用于生态气象监测评价的生态气象评价指数模型,为开展生态气象监测评价探索了一个较好的方法;吴宜进等^[17]选取 FVC、叶面积指数、热度等 5 项指标,并基于主成分分析法对西藏地区植被生态质量进行了评价,研究发现 2000—2016 年西藏地区植被生态质量总体呈现变好的趋势;杨绘婷等^[18]通过计算 FVC 和遥感生态指数来评估武夷山自然保护区植被生态质量的变化,结果显示 1979—2017 年保护区的植被生态质量和覆盖度均呈上升趋势。

目前,针对浙江省植被生态状况的研究同样取得了长足的发展。例如,李洪伟^[19]利用 2000—2006 年 MODIS 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据对浙江省植被覆盖的动态变化进行定量分析研究,结果表明 2000—2006 年全省植被覆盖度略有增加,但变化较小;高大伟等^[20]和何月等^[21]利用 GIMMS 和 MODIS 这 2 种 NDVI 数据集,分别对浙江省 1982—2006 年和 1982—2010 年植被覆盖度变化进行了分析研究,结果显示在 2 个研究期间内,浙江省植被覆盖度均呈缓慢下降趋势。

然而,研究发现利用单一 FVC 或 NPP 对某一区域植被生态质量进行评价,其结果往往缺乏客观性,会出现 FVC 相同、NPP 不同或 NPP 相同、FVC 不同等情况。因此,钱栓等^[22]利用中国区域 MODIS 月 NDVI 合成数据和逐日气象观测站资料,通过反演得出植被 NPP 和 FVC,并构建了一种可以综合反映

植被 NPP 和 FVC 的植被生态质量指数(vegetation ecological quality index, VEQI)模型。考虑到长期以来针对浙江省植被生态质量状况的研究仅是基于单一要素进行的,没有系统地结合植被 NPP 和 FVC 对植被生态质量指数进行动态监测。因此,本研究基于前人提出的 VEQI 模型,探究了浙江省 2000—2020 年植被生态质量的时空变化特征以及对气候因子与人类活动的响应,这对浙江省甚至全国其他地区的生态文明建设具有重要意义。

1 研究区概况

浙江省位于中国东南沿海、长江三角洲南翼, E118°01′~123°10′, N27°02′~31°11′之间。全省陆域面积 $10.55 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中山地和丘陵占 74.63%,平坦地占 20.32%,河流和湖泊占 5.05%,故有“七山一水二分田”之说。浙江省属于亚热带季风气候,全年平均气温 15.6~18.3℃,无霜期 241~351 d;年平均降水量 1 092~2 029 mm,降水季节分布不平衡,冬季最少,夏季最多;年平均日照时数 1 710~2 100 h。浙江省森林资源丰富,全省林地面积 $6.59 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中森林面积 $6.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,森林覆盖率达 61.15%,位居全国前列。浙江省土地覆盖主要以城市、农田和森林植被为主(图 1)。浙江省城镇区域主要分布在杭嘉湖平原、金衢盆地和宁波、台州等沿海地区,农田主要分布在中部盆地和北部平原地区,而森林覆盖区域主要分布在浙江西部和南部海拔较高的地区。

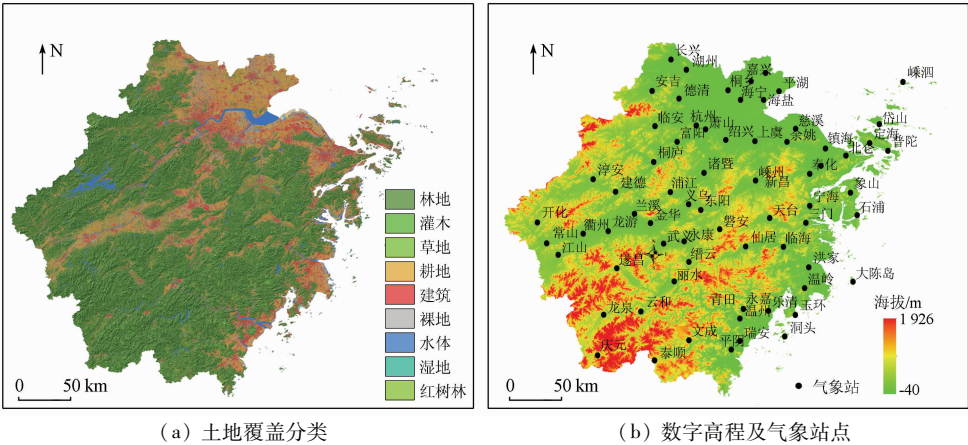


图 1 浙江省 2020 年土地覆盖和数字高程及气象站点分布
Fig.1 Land cover in 2020 and digital elevation and district and county representative meteorological station distribution over Zhejiang Province

2 数据处理和方法

2.1 数据源

2.1.1 MODIS 卫星资料

本文使用的卫星遥感资料主要包括 2000—

2020 年 Terra/MODIS 卫星 MOD13Q1 数据集中 NDVI 产品,产品轨道号为 H28V05 和 H28V06,2 幅遥感影像通过拼接可覆盖浙江省全境。MOD13Q1 数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,并利用国际通用的最大合成法获取月 NDVI 数据^[22]。年

NDVI 为通过逐月 NDVI 均值计算得出,可表示当年植被的平均生长状况。

2.1.2 气象观测资料

同期气象观测资料由浙江省气候中心提供,浙江省各县代表气象站点分布如图 1(b) 所示。首先选取浙江省 2000—2020 年有完整记录的气象观测站逐日气温、降水数据,将各站点日观测要素合成,建立月均值的长时间序列气候要素,再对 71 个站点月资料计算均值,在 ArcGIS 平台下利用反距离权重插值法(inverse distance weighting, IDW)生成全省 1 km 的网格数据作为整个研究区的气候月均值。

2.2 研究方法

2.2.1 植被 NPP 遥感估算

本文采用 MODIS 卫星 NDVI 月合成产品和气象观测数据,根据植被光能利用原理由陆地生态系统碳通量模型(terrestrial ecosystem carbon flux model, TEC) 计算月植被 NPP^[23-24]。TEC 模型是基于 MODIS 卫星遥感资料和气候数据,通过引入一个新的水分胁迫因子并结合降水驱动蒸散发模型建立的。TEC 模型具有计算简便、模型因子获取简单和符合中国植被实际情况等特点,具有较高的应用价值^[22]。NPP 计算公式为:

$$NPP_{mn} = GPP_{mn} - R_{mn} \quad (1)$$

$$GPP_{mn} = \varepsilon_{mn} \cdot T_{\varepsilon} \cdot W_{\varepsilon} \cdot FPAR \cdot PAR_{mn} \quad (2)$$

式中: NPP_{mn} 为第 m 年第 n 月的植被净初级生产力; GPP_{mn} 和 R_{mn} 分别为第 m 年第 n 月的总初级生产力和呼吸消耗量; ε_{mn} 为最大光能利用率; T_{ε} 为温度胁迫因子; W_{ε} 为水分胁迫因子; $FPAR$ 为植被吸收光合有效辐射的比例; PAR_{mn} 为第 m 年第 n 月的光合有效辐射,式中各参数计算方法和取值可参考 TEC 模型。

本文研究的浙江省 NPP 为每年 12 个月的累加值,可由下式进行计算:

$$NPP_m = \sum_{n=1}^{12} NPP_{mn} \quad (3)$$

式中: NPP_m 为第 m 年陆地植被 NPP, gC/m^2 ; n 为第 m 年的月序。

2.2.2 FVC 遥感估算

FVC 指植被冠层垂直投影占统计区剖面面积的百分比,是衡量区域生态环境状况的重要指标。本文利用 MODIS NDVI 月合成数据,根据混合像元分解法进行计算,公式如下:

$$FVC_{mn} = \frac{NDVI_{mn} - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: FVC_{mn} 为第 m 年第 n 月的 FVC 合成值; $NDVI_{mn}$ 为第 m 年第 n 月的 NDVI 合成值; $NDVI_{soil}$ 为像元为纯裸土时的值; $NDVI_{veg}$ 为像元为纯植被时的值。根据我国植被特点,本研究 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的取值分别为 0.05 和 0.95^[11]。

由于本文采用 NDVI 资料是 MODIS 卫星月合成产品,因此式(4)计算的月 FVC 反映的是月地表被绿色植被覆盖的程度。我国南北气候差异大,北方植被有明显的越冬期,冬季无森林的地区 $FVC_{mn} \approx 0$, 有森林的地区 $FVC_{mn} > 0$ 。尽管北方植被一年四季绿色程度变化较大,但有森林区域的植被覆盖度在同一时间高于无森林区域, FVC 可以反映有森林和无森林区域的植被覆盖变化。因此,全年地表被绿色植被覆盖的总体状况用 12 个月的平均 FVC 来反映,其计算公式为如下:

$$FVC_m = \frac{\sum_{n=1}^{12} FVC_{mn}}{n} \quad (5)$$

式中, FVC_m 为第 m 年全年平均 FVC; n 为第 m 年的月序。

2.2.3 植被生态质量指数遥感估算

植被 NPP 和 FVC 是反映陆地生态系统服务功能的 2 个最基本特征量,也是反映植被生态质量的关键特征量。然而,无论用植被 NPP,还是用植被覆盖度,只能反映陆地生态系统服务功能或植被生态质量的一个方面,即生产能力或覆盖能力。本文基于 MODIS 卫星植被 FVC 和 NPP 资料,采用权重加权的方式构建了浙江省 VEQI 模型,以此评估浙江省植被生态质量的时空分布特征。植被生态质量指数计算公式可表示为:

$$VEQI = 100 \times \left[f_1 \cdot FVC \cdot f_2 \left(\frac{NPP}{NPP_{max}} \right) \right] \quad (6)$$

式中: $VEQI$ 为全年植被综合生态质量指数,取值在 0~100 之间,其值越大表示综合了植被 NPP 和覆盖能力的植被生态质量越好, $VEQI = 0$ 说明植被 NPP 为 0,植被覆盖度也为 0, $VEQI = 100$ 说明植被 NPP 达历年最高,覆盖度为 100%; NPP_{max} 为全年植被 NPP 最高值,即当地气象条件最好情况下的陆地植被 NPP; f_1 和 f_2 分别为陆地 FVC 和 NPP 的权重系数,其值可根据不同的植被类型进行调整。本文选用 $f_1 = f_2 = 0.5$, 该权重系数取值方式在计算全国植被 VEQI 时空分布特征中取得了良好的应用^[19]。

VEQI 是由植被 NPP 和 FVC 采用权重加权方式计算而来,因此 VEQI 也应由 12 个月的平均值反

映,其计算公式为:

$$VEQI_m = \frac{\sum_{n=1}^{12} VEQI_{mn}}{n}, \tag{7}$$

式中: $VEQI_i$ 为第 m 年全年平均 FVC ; n 为第 m 年的月序。

2.2.4 植被生态参数变化趋势评价模型

植被生态参数变化趋势评价模型以植被生态要素(FVC , NPP 和 $VEQI$)为因变量、年为自变量,建立一元线性方程,其中斜率反映植被综合生态质量指数多年变化的趋势和快慢程度,一元线性方程表示为:

$$Q_m = k c_m + d, \tag{8}$$

式中: Q_m 为某一时间序列内的第 m 年植被生态要素; c_m 为相应年限内的第 m 年年号; d 为常数项,表示初始年份的 FVC ,即斜距; k 为该年限内的植被生态要素 Q_m 随 c_m 的变化趋势率,即斜率;其计算公式为:

$$k = \frac{t \sum_{m=1}^t (c_m Q_m) - Q_m \sum_{m=1}^t c_m}{t \sum_{m=1}^t c_m^2 - (\sum_{m=1}^t c_m)^2}, \tag{9}$$

式中: t 为要评价的年限数,本文评价的年限是 2000—2021 年,因此 $t = 21$ 。 $k > 0$ 表明植被生态要素在此 21 年呈提高(改善)趋势, $k < 0$ 表明呈下降趋势, $k = 0$ 则表明变化趋势不明显。

2.2.5 多元回归残差分析

气候因子(降水、气温)与人类活动是影响年际间植被生态质量变化的重要因素。近年来,学者们已利用残差模型对不同植被生态参量进行了人类活动和气候变化驱动力分析研究^[25-27]。在本文多元回归残差分析模型中,使用气温和降雨作为气候因子来模拟仅受气候变化影响下的植被生态质量。根据残差理论,模拟出的与观测得到的植被生态质量指数的插值,即为仅受人类活动影响下的植被生态质量。利用多元残差分析模型探究气候因子与人类活动对 $VEQI$ 的影响及相对贡献度方法如下: ①以气温和降雨栅格数据为自变量, $VEQI$ 为因变量,建立多元线性回归模型; ②基于拟合出的回归模型,以及气温和降雨数据计算出 $VEQI$ 的模拟值($VEQI_{CC}$),以此来表示气候因子对 $VEQI$ 的影响; ③以 $VEQI$ 残差($VEQI_{HA}$),即 $VEQI$ 真值与 $VEQI$ 模拟值之间的差值,来表征人类活动对 $VEQI$ 的影响。计算公式为:

$$VEQI_{CC} = aT + bP + c, \tag{10}$$

$$VEQI_{HA} = VEQI_{obs} - VEQI_{CC}, \tag{11}$$

式中: $VEQI_{CC}$ 为 $VEQI$ 在气温与降雨影响下的模拟值; T 和 P 分别为气温和降雨; a, b, c 为拟合系数; $VEQI_{HA}$ 为残差; $VEQI_{obs}$ 为遥感数据计算出的植被生态环境质量。

3 结果与分析

3.1 NDVI 和 FVC 时空变化

FVC 是衡量地表植被生长状况的重要指标。本文中 FVC 由 MOD13A1 产品经全年月均值计算得到。

图 2 为浙江省 2000—2020 年逐年植被 $NDVI$ 和 FVC 变化趋势。图中可以看出,浙江省植被 $NDVI$ 和 FVC 均呈增高趋势,且二者具有良好的一致性。2020 年全省 $NDVI$ 年均值达 0.65,为 2000—2020 年间最高值,相较于 2000 年(0.57)增长了 0.08。与此同时,2020 年全省 FVC 年均值达 67.3%,为 20 a 间最高,相较于 2000 年(58.7%)增加了 8.6 百分点。图 3 所示为分别为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年浙江省 FVC 空间分布。图中可以明显看出,2020 年浙江省西部和南部海拔较高的山地区域 FVC 较 2000 年显著提升。2000 年山地区域 FVC 多在 55% ~ 60% 之间,2020 年则多在 60% ~ 70% 之间,全省森林“绿度”显著提升。然而,随着城市化进程的加快,在海拔较低的城镇区域 FVC 呈降低趋势,如全境位于杭嘉湖平原的嘉兴市 2020 年 FVC (47.1%)较 2000 年(47.7%)降低了 0.6 百分点。

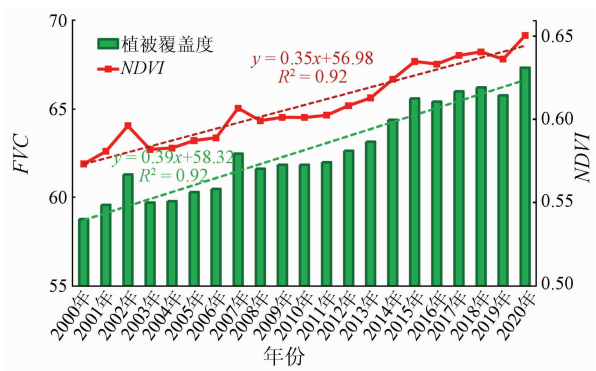


图 2 2000—2020 年浙江省植被 $NDVI$ 和覆盖度趋势
Fig.2 Variation of $NDVI$ and FVC in Zhejiang Province from 2000 to 2020

图 3 为浙江省 2000—2020 年 FVC 均值和改善率的空间分布,由图 3(a)可知,近 20 a 间浙江省山区 FVC 均值明显高于盆地和平原地区,山地区域 FVC 多在 70% 以上,盆地和平原多在 40% ~ 50% 之

间,城镇区域多在 40% 以下。由图 3 (b) 可知,2000—2020 年浙江省大部分区域 FVC 呈显著增长趋势,增加和减少趋势的陆地像元分别占 72% 和 29%,其中山地区域涨幅最为显著(50% ~ 75%)。然而,随着城市化进程的加快,城镇人口密集区域的

FVC 显示出降低趋势,特别是杭嘉湖城市群、宁波、台州和温州城市及周边地区。总体结果显示,浙江地区近 2000—2020 年 FVC 显著增长趋势,这与浙江省实施的生态保护工程有着密切联系,而浙江城市及周边地区的 FVC 出现明显下降。

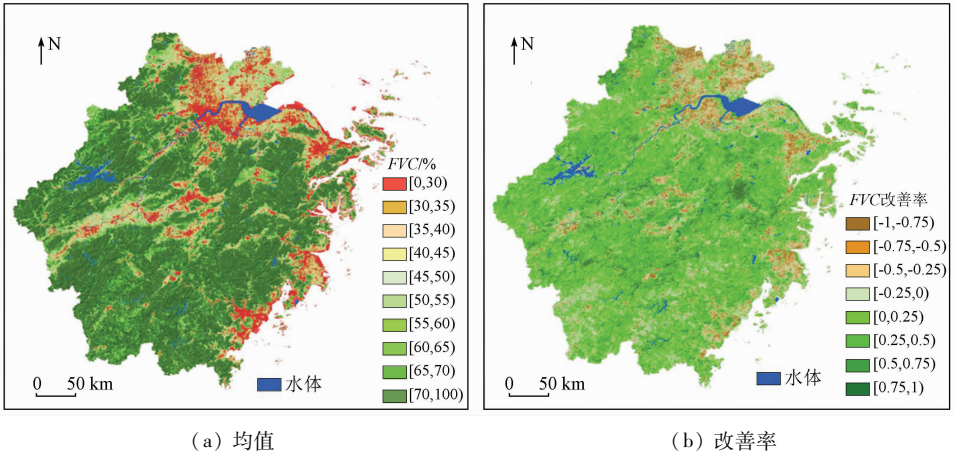


图 3 浙江省 2000—2020 年 FVC 均值和改善率空间分布

Fig. 3 Average value and improvement of FVC in Zhejiang Province from 2000 to 2020

3.2 植被 NPP 时空变化

图 4 为 2000—2020 年浙江省年际累加植被 NPP 时间变化趋势。从中可以看出,浙江省 2000—2020 年间植被 NPP 呈波动上升趋势,全省年植被 NPP 最大和最小值为 1 010.3 gC/m² 和 868.4 gC/m², 分别出现在 2018 年和 2003 年。2000—2020 年全省植被 NPP 平均值为 942.4 gC/m², 其中 2020 年全省年植被 NPP 为 964.1 gC/m², 较 2000 年(897.6 gC/m²) 增长了 66.5 gC/m²。由 2000—2020 年浙江省植被 NPP 均值空间分布来看(图 5), 全省大部分区域植被 NPP 在 500 ~ 1 650 gC/m² 之间。其中山地区域的 NPP 值较高, 在 800 ~ 1 250 gC/m² 之间; 平原和盆地区域的 NPP 值在 400 ~ 800 gC/m² 之间; 而城镇及其周边地区 NPP 值相对较低, 一般在 500 gC/m²

以下,这一方面是由于城镇地区建设面积比例较大,平均FVC较低,另一方面也是由于其周边多为

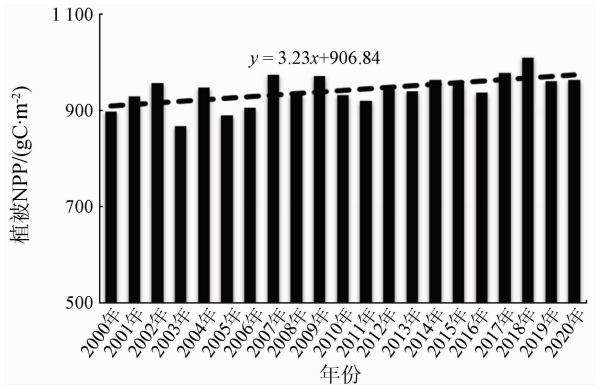


图 4 2000—2020 年浙江省植被 NPP 变化趋势

Fig. 4 Variation of NPP in Zhejiang from 2000—2020

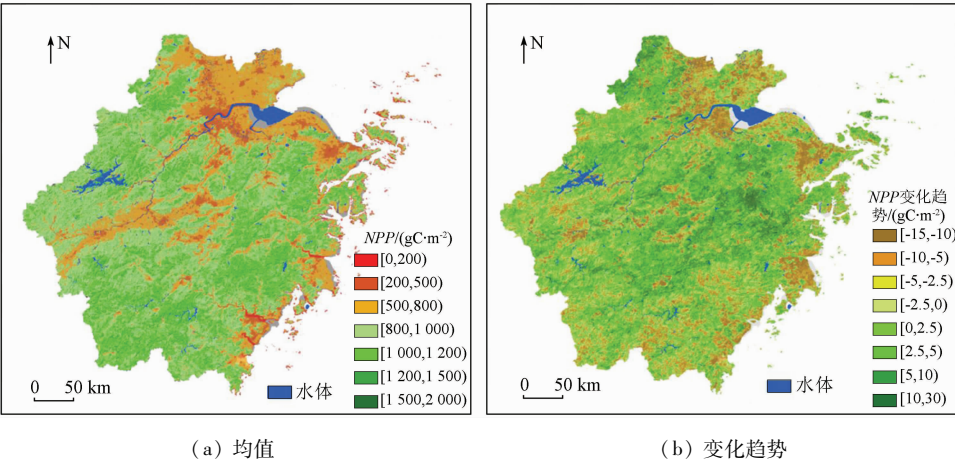


图 5 2000—2020 年浙江省植被 NPP 均值和变化趋势空间分布

Fig. 5 Average value and variation trend spatial distribution of NPP in Zhejiang Province from 2000 to 2020

农业植被,光能利用率相对较低引起的。

图 5(b) 为浙江省 2000—2020 年近 20 a 植被 NPP 变化率空间分布。对全省年总 NPP 进行逐像元的趋势分析,全区 NPP 平均值变化趋势线斜率为 3.23 gC/m^2 。由图 5(b) 可以看出,全省大部分地区 NPP 变化趋势在 $0\sim5\text{ gC/m}^2$ 之间;在绍兴南部、台州北部、和丽水北部等地区 NPP 明显呈上升趋势,部分地区上升趋势在 5 gC/m^2 以上;而在嘉兴市、杭州东部及台州东南部等地区 NPP 呈下降趋势,甚至部分地区下降趋势小于 10 gC/m^2 。

3.3 VEQI 时空变化

图 6 为 2000—2020 年浙江省 VEQI 变化趋势图。图中可以看出,近 20 a 浙江省 VEQI 呈波动上升趋势,平均 VEQI 值为 64.9,最大值出现在 2018 年,为 69.2。2000—2020 年全省 VEQI 实现了“三级跳”,2017—2020 年 VEQI 均值(68.2)较 2007—2016 年(65.4)和 2000—2006 年(62.7)2 个阶段有明显提高。2003 年全省 VEQI 为近 20 a 最低(60.9),较 2002 年降低约了 4.1,其原因在于 2003 年浙江出

现了严重干旱灾害,连续的高温少雨天气导致植被生态质量的下降。

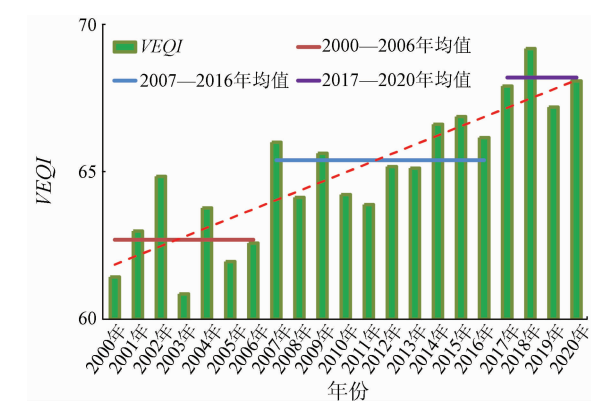


图 6 2000—2020 年浙江省 VEQI 变化趋势
Fig.6 Chang trend of the comprehensive ecological quality index of vegetation from 2000 to 2020 in Zhejiang Province

2000—2020 年平均年 VEQI 空间分布表明(图 7(a)),浙江省大部分地区 VEQI 在 50 以上。山地区域的 VEQI 较高,其值在 $[50,70)$ 之间,其中丽水

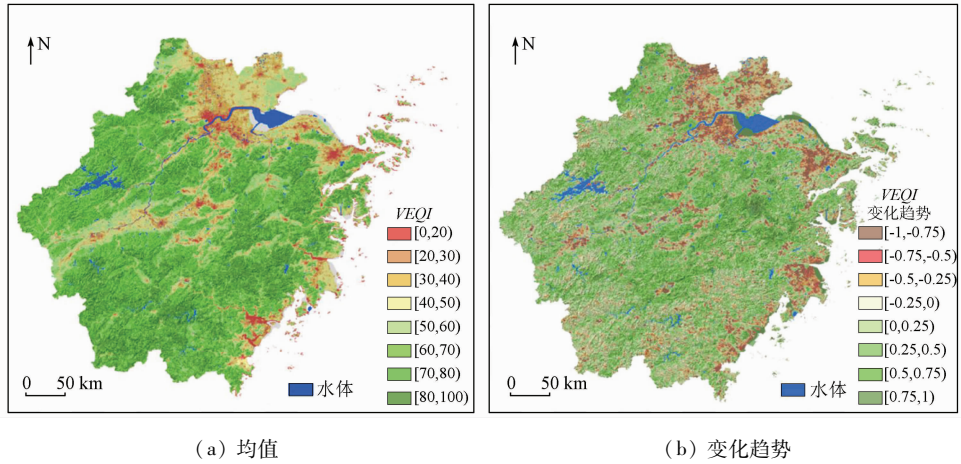


图 7 2000—2020 年浙江省 VEQI 均值和变化趋势

市庆元县山区 VEQI 达 77.8;平原和盆地区域的 VEQI 值在 $[40,60)$ 之间;而在城镇及周边地区的 VEQI 相对较低,一般在 40 以下。在 2000—2020 年浙江省 11 个地(市)平均 VEQI 排名中,排名前三的分别为丽水市(73.92)、温州市(68.1)和衢州市(65.87)。浙江省 VEQI 多年变化趋势率空间分布(图 7(b))显示,2000—2020 年全省超 86% 区域面积的 VEQI 呈提高态势,大部分区域平均每年增加 $0.25\sim0.5$,其中绍兴南部和台州南部地区 VEQI 年平均速率在 $[0.5\sim0.75]$ 之间。由于城市化进程的加快,近 20 a 浙江省部分城镇地区 VEQI 呈减少趋势,如杭州市、嘉兴市、宁波市和台州市部分城镇地区质量指数减少 $[0.5\sim0.75]$ 之间。

3.4 VEQI 精度验证及驱动力分析

大量研究显示,植被 NPP 和 FVC 的动态变化主要受人类活动和气候条件的共同影响^[6,8,10-11]。其中,气候变化尤其是气温、降雨的变化,对陆地植被的生长具有重要影响。因此,本研究以气温和降雨作为主要气候因子,探究了浙江省 2000—2020 年 VEQI 的时空变化对气候以及人类活动的响应。

首先对基于多元线性回归残差模拟的浙江省 VEQI 进行精度分析。图 8 分别为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年基于多元线性回归模型模拟的 VEQI 和 MODIS 卫星观测 VEQI 的散点图。图中可以看出,模拟 VEQI 与观测 VEQI 具有良好的一致性,两者 $R^2(P<0.01)$ 分别为 0.89(2000

Fig.7 Average value and variation trend spatial distribution of VEQI in Zhejiang Province from 2000 to 2020

年)、0.93 (2005 年)、0.89 (2010 年)、0.93 (2015 年)和 0.93 (2020 年),Pearson 相关系数(图中 r) 分

别为 0.94 (2000 年)、0.96 (2005 年)、0.94 (2010 年)、0.97 (2015 年)和 0.97 (2020 年)。

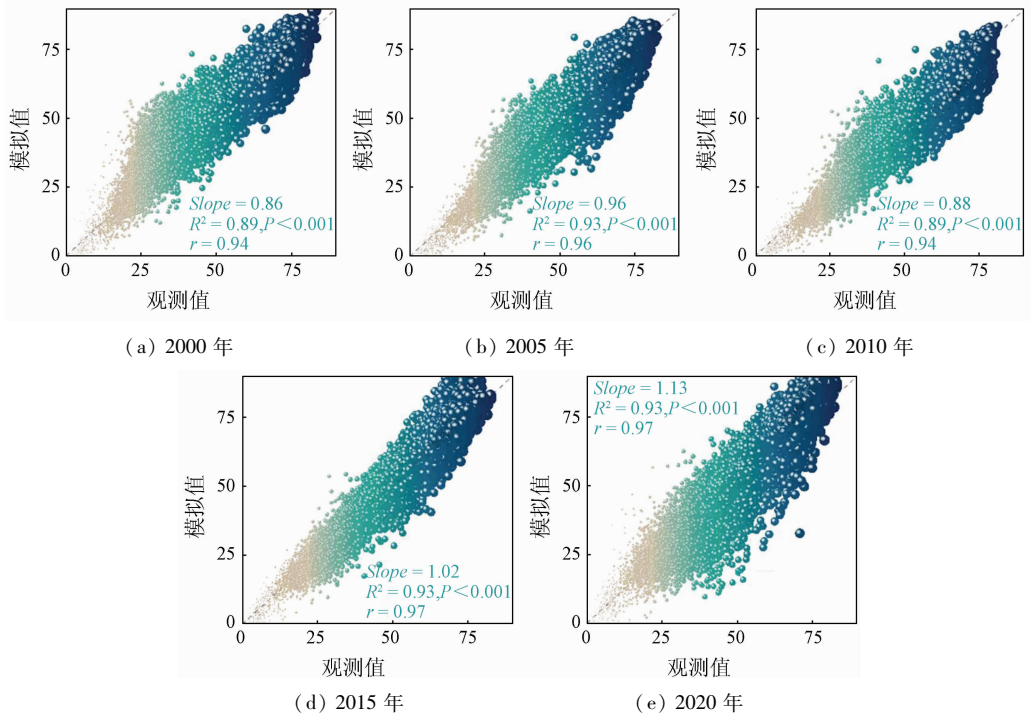


图 8 不同年份模拟 VEQI 和观测 VEQI 散点图

Fig.8 Scatter diagram between simulated and observed VEQI in different year

图 9 为基于多元线性回归模型的浙江省 VEQI 空间变化及其驱动力因素。从图 9(a)中可以看出,2000—2020 年,浙江省大部分区域的植被生态环境质量呈现出上升的趋势,而只在主要的城市扩张区域呈现出显著的下降趋势,其中较为明显的有杭州

市、湖州市、嘉兴市、宁波市、台州市以及金华市。图 9(b)为人类活动驱动下的 VEQI 的变化趋势空间分布图,从图中可以看出,人类活动驱动下的 VEQI 变化趋势与图 9(a)中的 VEQI 真实变化趋势的空间分布具有较高的相似性,这表明 2000—2020 年浙江

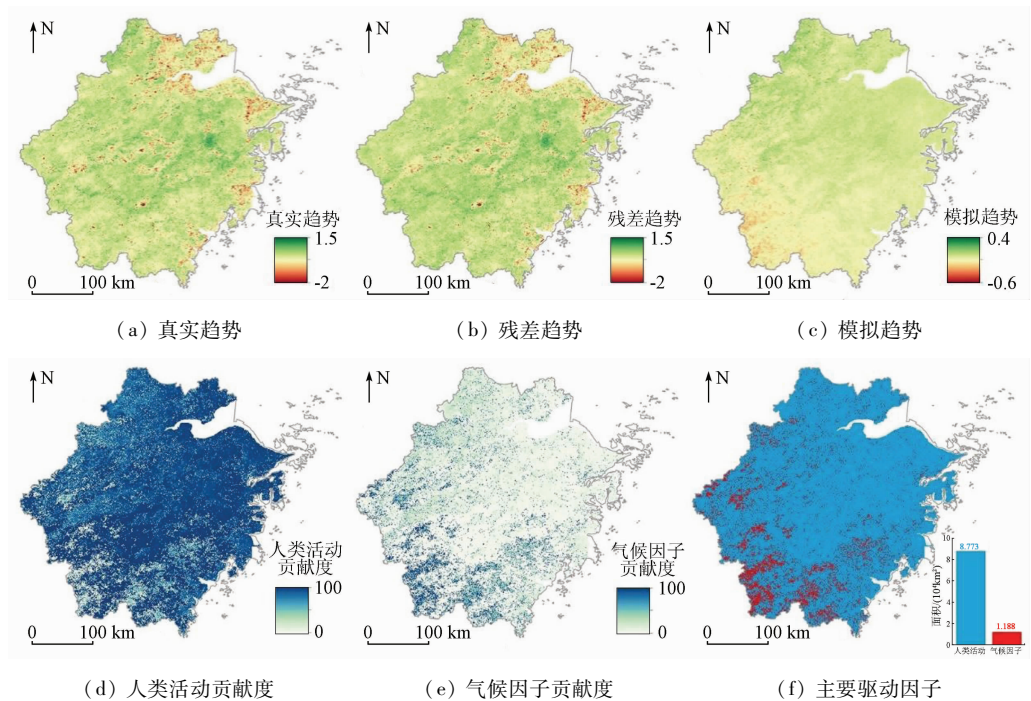


图 9 浙江省 VEQI 变化驱动力因素分析

Fig.9 Driving force analysis of VEQI variation in Zhejiang Province

省的 VEQI 的变化主导因素为人类活动。图 9(c) 为气候因子驱动下的近 20 a 浙江省 VEQI 的变化趋势空间分布图,从图中可以看出,2000—2020 年浙江省西南区域(丽水市、衢州市)的 VEQI 受气候影响呈现出下降趋势,而大部分区域受气候影响程度均较小。

图 9(d)和图 9(e)分别表示人类活动与气候因子对浙江省近 20 a 植被生态环境质量变化的贡献度空间分布图。从中可以看出,浙江省近 20 a 的 VEQI 变化的主导驱动因素是人类活动,仅在浙江省西南小部分地区气候因子占据主导因素。从图 9(f)可以看出,人类活动贡献度大于气候因子的面积约为 8.773 万 km²,而气候因子贡献度大于人类活动的面积仅为 1.188 万 km²。

4 结 论

浙江省是“两山”理论的发源地,同时也是我国第一个生态省,研究该区域植被生态质量状况对生态文明建设具有重要的参考价值。本文基于 MODIS 卫星遥感资料以及气象站点观测数据,对浙江省 2000—2020 年植被 NDVI, NPP, FVC 和 VEQI 等关键特征量进行了时空变化以及驱动因素分析,结果表明:

1)2000—2020 年,浙江省植被 NDVI 和 FVC 显著上升。2020 年全省 FVC 年均值达 67.3%,为 2000—2020 年间最高,相较于 2000 年(58.7%)增加了 8.6 百分点。

2)2000—2021 年间,浙江省植被 NPP 呈波动上升趋势,平均每年增加 3.23 gC/m²。而在嘉兴、杭州东部及台州东南部等平原城镇地区 NPP 呈下降趋势,部分地区下降趋势低于 10 gC/m²。

3)2000—2021 年间,浙江省 VEQI 呈波动上升趋势,多年平均 VEQI 为 64.9,最大值出现在 2018 年,为 69.2,且山地区域的 VEQI 明显高于盆地和平原地区。

4)浙江省 2000—2021 年间,VEQI 变化的主导驱动因素是人类活动,仅在浙江省西南小部分地区气候因子占据主导因素。

参考文献(References):

[1] Chen C, Park T J, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land - use management [J]. Nature Sustainability, 2019(2): 122 - 129.

[2] Zuo L J, Zhang Z X, Carlson K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land - use change [J]. Nature Sustainability, 2018(1): 304 - 313.

[3] Ahrends A, Hollingsworth P M, Beckschafer P, et al. China's fight to halt tree cover loss[C]//Proceedings of the Royal Society Biological Sciences, 2017, 284(1854): 20162559.

[4] Xu D, Yang F, Yu L, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco - environmental quality and urbanization from multi-source remote sensing data [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948.

[5] Guo E, Liu X, Zhang J, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in northeast China [J]. Journal of Hydrology, 2017: 231 - 247.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5058 - 5069.

Jia J H, Liu H Y, Lin Z S. Multi - time scale changes of vegetation NPP in six provinces of northwest China and their responses to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5058 - 5069.

[9] Liu C, Dong X, Liu Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China [J]. Catena, 2015, 125: 190 - 199.

[10] 陈舒婷, 郭 兵, 杨 飞, 等. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511 - 2527.

Chen S t, Guo F, Yang F, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai - Tibet Plateau from 2000 to 2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2511 - 2527.

[11] 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.

[12] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因 [J]. 中国环境科学, 2019, 039(11): 4804 - 4811.

Guo Y Q, Wang N J, Chu X S, et al. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine [J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4804 - 4811.

[13] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in southwest China [J].

Agricultural and Forest Meteorology,2018,256:10–21.

[14] 毛留喜,李朝生,侯英雨,等. 2006 年上半年全国生态气象监测与评估研究[J]. 气象,2006(11):105–112.

Mao L X,Li C S,Hou Y Y,et al. China Meteorologically – driven ecological monitoring and assessment in the first half of 2006[J]. Meteorological Monthly,2006(11):105–112.

[15] 毛留喜,钱 拴,侯英雨,等. 2006 年夏季川渝高温干旱的生态气象监测与评估[J]. 气象,2007(3):83–88,132–133.

Mao L X,Qian S,Hou Y Y,et al. Study on the meteorologically – driven ecological monitoring and assessment of high temperature and drought of Sichuan – Chongqing area in summer 2006[J]. Meteorological Monthly,2007(3):83–88,132–133.

[16] 钱 拴,毛留喜,侯英雨,等. 北方草地生态气象综合监测预测技术及其应用[J]. 气象,2008(11):62–68.

Qian S,Mao L X,Hou Y Y,et al. Technology and application of ecology meteorological synthetic monitoring and predicting for northern grassland in China [J]. Meteorological Monthly, 2008 (11):62–68.

[17] 吴宜进,赵行双,奚 悦,等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报,2019,74(7):1438–1449.

Wu Y J,Zhao X S,Xi Y,et al. Comprehensive evaluation and spatial – temporal changes of eco – environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006—2016[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(7):1438–1449.

[18] 杨绘婷,徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报,2020,31(2):187–196.

Yang H T,Xu H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(2):187–196

[19] 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.

[20] 高大伟,张小伟,蔡菊珍,等. 浙江省植被覆盖时空动态及其与生态气候指标的关系[J]. 应用生态学报,2010(6):171–175.

Gao D W,Zhang X W,Cai J Z,et al. Spatiotemporal variations of vegetation cover in Zhejiang Province and their relations to ecoclimatic indices[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010(6):171–175.

[21] 何 月,樊高峰,张小伟,等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. 生态学报,2012,32(14):4352–4362.

He Y,Fan G F,Zhang X W,et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(14):4352–4362.

[22] 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.

[23] 曹 云,钱永兰,孙应龙,等. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J]. 生态环境学报,2020,29(5):857–865.

Cao Y,Qian Y L,Sun Y L,et al. Spatial – temporal variations of forest vegetation and climatic driving force analysis in southwest China based on MODIS NDVI and climate data [J]. Ecology and Environmental Sciences,2020,29(5):857–865.

[24] 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.

[25] 金 凯,王 飞,韩剑桥,等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报,2020,75(5):75–88.

Jin K,Wang F,Han J Q,et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica,2020,75(5):75–88.

[26] 田智慧,任祖光,魏海涛. 2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学,2022,43(2):743–751.

Tian Z H,Ren Z G,Wei H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science,2022,43(2):743–751.

[27] 顾羊羊,邹长新,乔旭宁,等. 2000—2015 年黔西南州植被覆盖时空变化及影响因素分析[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(11):1413–1422.

Gu Y Y,Zou C X,Qiao X N,et al. Spatio – temporal variations of fractional vegetation coverage and influencing factors in Qianxinan Prefecture from 2000 to 2015 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2021,37(11):1413–1422.

Spatio – temporal variations of vegetation ecological quality in Zhejiang Province and their driving factors

FANG He¹, ZHANG Yuhui¹, HE Yue¹, LI Zhengquan¹, FAN Gaofeng¹,
XU Dong², ZHANG Chunyang³, HE Zhonghua¹

(1. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310051, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Quzhou Meteorological Observatory, Quzhou 324000, China)

Abstract: Zhejiang Province is both the birthplace of the theory that both the mountain of gold and silver and the lushmountain with lucid waters are required (also known as the Two Mountains theory) and the first ecological

province in China. The study on the vegetation ecological quality of Zhejiang can be used as an important reference for the construction of ecological civilization. Based on multi – source remote sensing data and meteorological observation data, this study investigated the spatio – temporal variations of vegetation ecological quality in Zhejiang during 2000—2020, as well as their response to climate factors and human activities. The results show that: ① Both the fractional vegetation cover (FVC) and the net primary production (NPP) in Zhejiang showed an upward trend during 2000—2020, with significantly increased vegetation greenness; ② The vegetation eco – environmental quality in Zhejiang showed a fluctuating upward trend during 2000—2020, with the vegetation ecological quality indices (VEQIs) of mountainous areas significantly higher than those of basin and plain areas; ③ The dominant factor driving the VEQI variations in Zhejiang during 2000—2020 is human activities, while climate factors occupied a dominant position only in some areas of southwestern Zhejiang. This study deepens the understanding of the spatio – temporal variations of vegetation ecological quality in Zhejiang and their driving factors and, thus, is of great significance for the construction of ecological civilization in Zhejiang and even other regions in China.

Keywords: ecology; remote sensing; net primary production; vegetation; MODIS

(责任编辑: 李 瑜)