

DOI: 10.5846/stxb202107091848

焦阜生, 许小娟, 龚海波, 刘会玉, 林振山. 基于集合经验模态分解去趋势的水分利用效率对气候变化响应的高程分异——以“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6985-6996.

Jiao F S, Xu X J, Gong H B, Liu H Y, Lin Z S. Elevation differences in the response of ecosystem water use efficiency to climate change based on EEMD detrending: A case study of the provinces along the “21st Century Maritime Silk Road”. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6985-6996.

基于集合经验模态分解去趋势的水分利用效率对气候变化响应的高程分异

——以“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份为例

焦阜生^{1,3,4,5}, 许小娟², 龚海波^{1,3,4,5}, 刘会玉^{1,3,4,5,*}, 林振山^{1,3,4,5}

1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

3 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023

4 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023

5 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:水分利用效率(WUE)是表征陆地碳-水循环耦合关系的重要指标,但其对气候变化响应的高程分异仍不清楚。通过集合经验模态分解(EEMD)去趋势和偏相关方法,以“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份为研究区,揭示 WUE 对气候变化的响应及其随高程的分异。研究表明:(1)研究区内 WUE 多年均值由中心向南北递减。不同植被类型的 WUE 多年均值由高到低依次为:常绿针叶林、混交林、常绿阔叶林、稀树灌木草地、耕地和城市建设用地。(2)51.11%的区域表现出均温与 WUE 的正相关;而 81.46%地区表明温差的扩大会使得 WUE 增加;有近一半的研究区表明最高温的升高有利于提高 WUE,而最低温的作用则相反;有 67.99%的区域表明降水增多反而会会导致 WUE 的减少。(3)在大多数土地覆盖类型,日温差和最低温主要与 WUE 呈正相关,而最高温和降水主要与 WUE 呈负相关。在常绿针叶林、耕地和城市建设用地,日均温与 WUE 呈负相关。在其他三种植被类型下则呈正相关。(4)在低海拔地区,均温与 WUE 呈负相关而在中高海拔地区则转变为正相关关系。而最高温则正好相反。降水与 WUE 的负相关关系系数随高度的增加而不断加强,而温差和最低温与 WUE 的正相关关系也随高度的增加而剧烈波动增强。

关键词:水分利用率;气候变量;集合经验模态分解(EEMD);去趋势;偏相关

Elevation differences in the response of ecosystem water use efficiency to climate change based on EEMD detrending: A case study of the provinces along the “21st Century Maritime Silk Road”

JIAO Fusheng^{1,3,4,5}, XU Xiaojuan², GONG Haibo^{1,3,4,5}, LIU Huiyu^{1,3,4,5,*}, LIN Zhenshan^{1,3,4,5}

1 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

3 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210023, China

4 State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China

5 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971382);江苏省科技厅研究生科研创新项目(1812000024462)

收稿日期:2021-07-09; **采用日期:**2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhuiyu@nynu.edu.cn

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important index representing the coupling relationship between terrestrial carbon and water cycle, but the elevation differences in the response of WUE to climate change remains unclear. By Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) de-trending and partial correlation methods, this paper takes provinces along the "21st Century Maritime Silk Road" as examples to reveal the response of WUE to climate change and its differentiation with elevation. The results showed that: (1) the multiyear average WUE decreased from the center to the south and the north. The multiyear average WUE of different vegetation types from high to low was as follows: evergreen needle-leaf forest, mixed forest, evergreen broadleaf forest, deciduous broadleaf forest, savannas, croplands and urban/built-up. (2) About 51.11% of the area showed a positive correlation between average temperature and WUE, and 81.46% of the area showed that diurnal temperature and WUE were positively correlated. Nearly half of the study area indicated that the highest temperature had positive coefficient with WUE, while the lowest temperature was the opposite. In 67.99% of the area, increasing precipitation led to less WUE. (3) In most land cover types, the daily diurnal temperature range and the minimum temperature were mainly positively correlated with WUE, while the maximum temperature and precipitation were negatively correlated with WUE. In evergreen coniferous forests, croplands and urban/built-up, the daily average temperature was negatively correlated with WUE, while it was positive correlation in the other three vegetation types. (4) Average temperature had a negative coefficient with WUE in the low-altitude area, while the coefficient was positive in the mid- and high-altitude area. But it was the opposite in the relationship between the maximum temperature and WUE. The negative correlation between average precipitation and WUE became stronger with altitude rising. Meanwhile, the positive correlation between diurnal temperature and WUE, the minimum temperature and WUE also became stronger with altitude rising but with wild fluctuation.

Key Words: water use efficiency; climate variables; ensemble empirical mode decomposition (EEMD); de-trending; partial correlation

水分利用效率(WUE)是反应植被水分利用状况的一个客观评价指标,是指植被光合作用生产过程中所固定的CO₂的量与蒸散作用所消耗的H₂O之比^[1-3],其中,蒸散作用包括植被的蒸腾、植被表面水分蒸发和土壤水分蒸发^[2]。水分利用效率不仅是表征陆地碳-水循环耦合关系的重要指标,也是反映全球变化对陆地生态系统影响的重要参数之一^[3-5]。气候变化通过影响植被的光合作用以及蒸散过程显著影响了植被的水分利用率,进而引起生态系统功能的变化^[6-8]。

以全球变暖为特征的全球气候变化是人类迄今面临的重大环境问题之一^[9]。陆地生态系统的水分利用效率的时空变化及其对气候变化的响应已成为国内外研究的热点^[10-13]。然而大多研究并没有进行去趋势处理。由于时间序列的非平稳性,使得其变化具有明显的趋势性。非平稳的时间系列表现出相同的趋势变化,并不代表两者之间有直接的相关性。因此,未经去趋势处理的时间序列间的相关分析会产生伪相关^[14]。去除时间序列趋势的影响,仅仅以年际变化值来判断WUE对气候因子间的响应,可以更精确地得到响应结果^[14]。因此,在研究植被动态和气候变化的关系时有必要进行去趋势处理。采用线性模型去趋势是目前应用最广的方法之一。线性模型通常假设时间序列的趋势保持不变。线性的这种基本假设可能会导致非平稳时间序列中的虚假趋势和错误的统计推断^[15]。植被变化具有非线性特征^[16],这使得WUE的变化是不平稳的,因此其趋势应该具有随时间变化的非线性特征。因此,线性模型不能准确地反映时间序列的趋势。集合经验模态分解(EEMD)是一种适用于非线性、非平稳时间序列的自适应时频分析方法^[17]。EEMD方法通过迭代的方法将原始序列分解成一组有限的、频率递减的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个长期趋势项。不同于先验函数形式的拟合方法,EEMD趋势不遵循任何预设的函数形式,且随时间变化。并且EEMD趋势对时间序列的延伸不敏感,即意味着未来的时间序列不会对已发生的趋势产生影响^[18]。这些特性使得EEMD更可靠地且更有效地揭示非线性、非平稳时间序列的非线性趋势。因此,EEMD去趋势比线性去趋势适合评估植被对气候的响应^[19]。

植被生长通常显示出明显的垂直地带性差异。与海拔相关的水热条件的差异通常被认为是沿海拔梯度观测到的植被生长状况差异的主要原因^[20]。在气候变化的背景下,高海拔地区的升温速度通常比低海拔地

区更快^[21]。但是现有的关于 WUE 对气候响应的研究多集中在对时空格局^[10-13,22]和水平地带性^[23],缺乏针对高程分异的分析。这导致对 WUE 对气候变化响应的认识不够全面。

“21 世纪海上丝绸之路”的倡议提出以来,引发了众多学者的关注^[24-28]。“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份自然资源丰富、生态系统格局复杂,是中国重要的经济发展区之一,同时也是响应气候变化的重要区域之一。这些地区位于陆地和海洋相互作用的过渡地带,是一个既有别于陆地又异于海洋的特殊地理环境。该地区快速的城市化进程改变了下垫面性质,导致了生态环境的脆弱性,因此对气候变化的响应敏感。鉴于现有研究的不足,本研究以“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份作为研究区域,结合 EEMD 去趋势方法,利用偏相关分析(1)揭示 WUE 对气候变化响应的空间分布格局;(2)探讨 WUE 对气候变化响应的不同土地覆盖分异和 高程分异,以期为我国在“一带一路”政策实施中可能面临的生态保护难题和经济发展困境提供理论指导与科学依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

东南沿海的江苏、上海、浙江、福建、广东和海南五省一市(18°10'—30°45'N,108°37'—123°10'E),是“21 世纪海上丝绸之路”的沿线省份(图 1)。该地区自然资源丰富、生态系统格局复杂,人口占全国总人口的 23.4% (国家统计局 2019 年数据),GDP 占全国总值的 34.7% (国家统计局 2019 年数据),是中国最重要的经

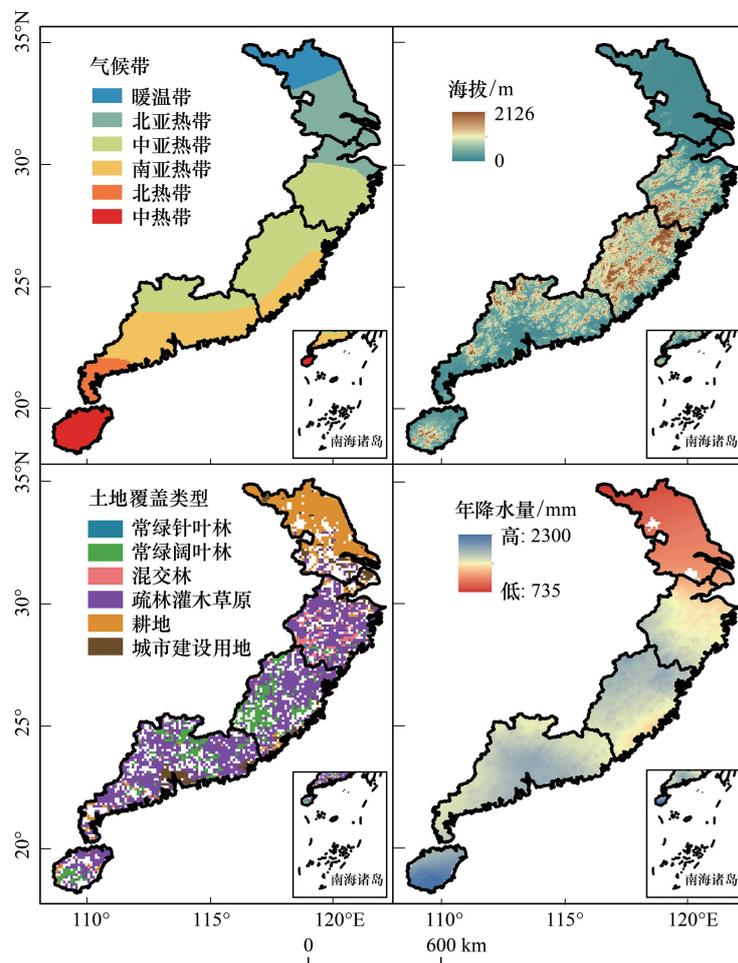


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

济发展区和对外开放区,同时也是响应气候变化的重要区域之一。研究区的陆地面积约为 55.56 万 km²。北部为苏北平原和太湖平原,绝大部分地区海拔低于 50m,中部、南部地区为低山丘陵。研究区大部分地区为亚热带季风气候,以疏林灌木草地、亚热带常绿阔叶林为主,间或分布常绿针叶林;北部小部分地区为温带季风气候,主要以农田耕地为主;南部零星分布着热带雨林、热带季雨林。研究区大部分位于年降水量大于 800mm 的湿润区,海南部分地区年降水量超过 2000mm。

1.2 数据及处理

本文采用的总初级生产力(GPP)数据源自北京师范大学全球陆表特征参量(GLASS)产品(<http://glass-product.bnu.edu.cn/>)。GLASS-GPP 产品是通过使用 8 个广泛使用的光利用效率模型的贝叶斯算法集成生成的。通过 155 个全球涡动相关点的验证,覆盖了 9 个主要的陆地生物群落,广泛应用于全球和区域生态系统碳循环研究^[29]。

中国陆地蒸散发(ET)数据集来自国家青藏高原数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。该数据集通过非线性互补关系模型模拟了 ET,并通过 13 个涡动相关系数和 10 个流域进行了验证,比其他主流 ET 产品更准确^[30]。

土地覆盖类型是根据 MODIS MCD12C1 V6 产品确定的(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD12C1.006/>)。该产品为年数据,提供 2001—2019 年每个网格的主导土地覆盖类别。采用了国际地圈-生物圈计划(IGBP)制定的土地覆盖分类方案。为了减少分类误差和土地覆被变化可能带来的影响^[31],本文还对土地覆盖进行了特征分析。在特征分析中,仅保留 2001—2015 年土地覆盖类型保持不变的像元。此外,“稀树草原”被重新分类为“疏林灌木草地”。“农田/自然植被嵌合体”被重新分类为“耕地”。最后,本研究使用的土地覆盖数据包括常绿针叶林(ENF)、常绿阔叶林(EBF)、混交林(MF)、疏林灌木草地(SAV)、耕地(CRO)和城市建设用地(UB) 7 类土地覆盖(图 1)。

本文所用的气象数据包括 1980—2016 年的气温、降水数据,来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》。该数据集的时间范围为 1951 年至今,包含中国 699 个基准、基本气象站的气温、降水等要素逐日数据。本研究首先对气象数据进行筛选,剔除缺失数据的气象台站,提取各个气象台站的 DEM 数据(来自 USGS),再根据各个气象站点实际地理位置运用 ANUSPLIN 软件将气象数据插值为空间栅格气候数据。

为了与 ET 数据相匹配,所有数据均重采样至 0.1°。

生态系统尺度的水分利用效率(WUE)是生态系统功能的有效指标之一,用于表征碳-水循环之间耦合关系,可以通过 GPP 与 ET 的比值在像元尺度上进行评价。全年 WUE 是 GPP 和 ET 全年累积的比值^[1]。年水分利用效率(Annual WUE)代表了某一特定年份内生态系统 C 同化与 H₂O 消耗之间的关系。生态系统尺度的水分利用效率计算公式如下:

$$WUE = \frac{GPP}{ET}$$

1.3 研究方法

1.3.1 集合经验模态分解

集合经验模态分解可将非平稳的时间序列分解为一组有限的分量和一个长期趋势^[33]。EEMD 分解过程如下^[17,18,32—34]:

第一步:向原始时间序列数据 $x(t)$ 中加入高斯白噪声 $w_1(t)$ 。白噪声的振幅为原始数据的 0.2 倍标准差。

$$x_1(t) = x(t) + w_1(t)$$

第二步:将所有极大值点和极小值点用三次样条曲线连接,分别形成新时间序列数据 $x_1(t)$ 的上下包络线($e_u(t)$ 和 $e_l(t)$);然后,新时间序列数据 $x_1(t)$ 减去上下包络线的均值 $m_1(t)$ 。

$$m_1(t) = \frac{e_u(t) + e_l(t)}{2}$$

$$f_1(t) = x_1(t) - m_1(t)$$

第三步:确定 $f_1(t)$ 是否满足停止条件(在任一点都接近于 0)。如果满足,则停止分解,如果不满足,将 $f_1(t)$ 作为新的时间序列数据并重复第二步。最终,得到第一个固有模态函数: $imf_1(t)$ 。

$$f_2(t) = f_1(t) - m_2(t)$$

$$imf_k(t) = f_k(t) = f_{k-1}(t) - m_k(t)$$

第四步:将 $x_1(t)$ 减去 $imf_1(t)$ 得到剩余量 $R_1(t)$ 。如果 $R_1(t)$ 仍包含振荡成分,就以 $R_1(t)$ 作为新的时间序列数据重复第二步和第三步。

$$R_1(t) = x_1(t) - imf_1(t)$$

$$R_n(t) = R_{n-1}(t) - imf_n(t)$$

因此, $x_1(t)$ 被分解成一系列频率递减的固有模态函数和一个单调的或者有至多一个极值点的趋势项(图 2)。

$$x_1(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + R_n(t)$$

第五步:重复第一步至第四步 1000 次,并在每次中加入不同的高斯白噪声。将所有分解结果的固有模态函数和长期趋势的相对对应集合均值作为分解的最终结果。

Wu 和 Huang^[17] 指出白噪声振幅的大小对分解结果影响较小,而且由于 EEMD 是多次计算取集合平均值作为最终结果的,加入的白噪声会相互抵消,因此不会对原始数据信息造成干扰。

按照 Liu 等^[19] 的研究,原数据减去长期趋势项得到新的、去除了 EEMD 趋势的时间序列。因此,本文用 EEMD 方法对 WUE 和各个气候因子均进行去趋势处理并将其用于接下来的偏相关分析中。

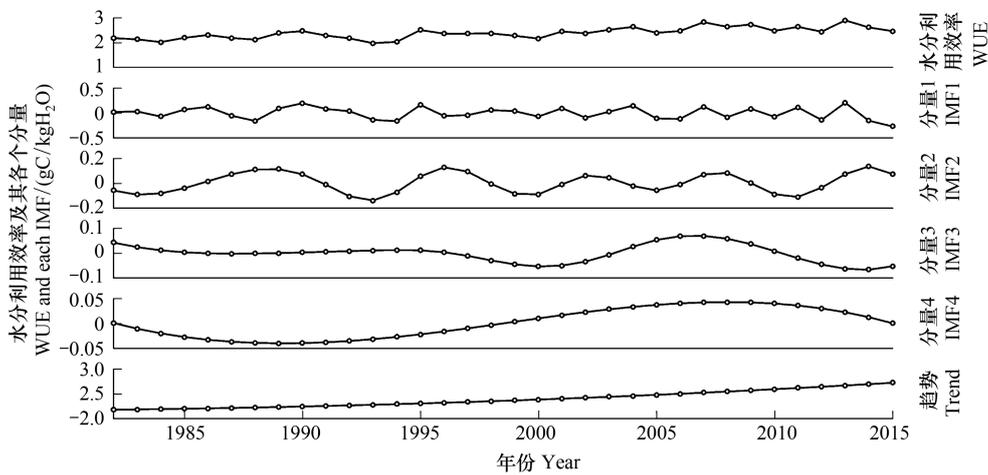


图 2 研究区平均水分利用效率及其集合经验模拟分解结果

Fig.2 Average WUE and the results decomposed by EEMD in regional scale

1.3.2 偏相关分析

本文使用偏相关分析的方法来确定每个像元中 WUE 与各个气候因子的关系。偏相关分析是一种广泛被使用的统计工具,用于将两个变量之间的关系从与多个相关变量的混杂影响中分离出来。每个偏相关系数的绝对值都位于[0,1]。当偏相关系数的绝对值等于 1 时,这两个变量就完全相关。相反,当偏相关系数等于 0,这两个变量是完全不相关的。如果偏相关系数为正,这两个变量就是正相关关系。如果偏相关系数为负,这两个变量就是负相关关系。

偏相关系数的计算公式如下：

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

式中, $r_{xy(z)}$ 为将变量 z 固定后变量 x 与变量 y 之间的偏相关系数; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为变量 x 与变量 y 之间的相关系数、变量 x 与变量 z 之间的相关系数、变量 y 与变量 z 之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 WUE 多年均值的空间分布格局

如图 3 所示, 研究区内 WUE 多年均值总体上呈现由南北向中间递增的分布趋势。浙江省、福建省及广东省东部和北部由于森林分布较广, WUE 多年均值较高, 大部分地区 WUE 多年均值超过 $3 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 。而长江三角洲、珠江三角洲和雷州半岛由于城市化水平较高, WUE 多年均值少于 $1 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 。常绿针叶林的 WUE 多年均值最高, 而混交林、常绿阔叶林、疏林灌木草地和耕地的 WUE 多年均值依次降低。城市建设用地的多年 WUE 均值最低, 仅达到了常绿针叶林的一半。

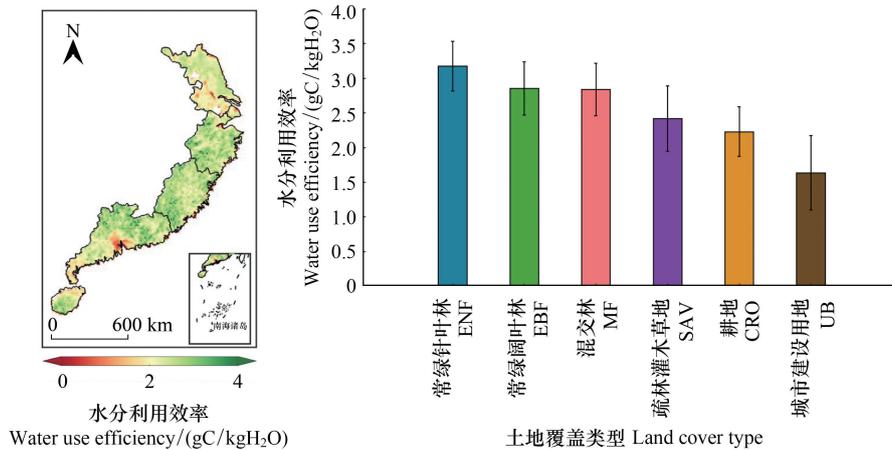


图 3 研究区多年平均 WUE 的空间格局与不同土地覆盖类型的 WUE 均值

Fig.3 The spatial pattern of multi-year average WUE and the average WUE under different land cover types

2.2 WUE 对气候变化响应的高程分异

图 4 显示了 WUE 与各个气候变量偏相关系数的空间分布格局。在 51.11% 的研究区内, WUE 与均温表现为正相关, 主要分布在福建、浙江东部、广东北部、苏北平原和杭嘉湖平原; 48.89% 的地区呈现负相关关系, 这些地区主要是江苏南部和西部、上海、浙江中部、广东东部和海南。81.46% 研究区表现出 WUE 与温差的正相关关系, 只有福建中部、海南和广东的零星地区呈现负相关。最高温与 WUE 的负相关地区略多于正相关的地区, 主要集中在福建和浙江南部, 广东北部、江苏北部及海南岛亦有分布。最低温与植被水分利用率的显著负相关主要分布在除去上海市、浙江省西部、福建省西南部、广东省东南部和海南岛西南部的地区内。降水与 WUE 主要呈负相关性, 只有在海南、长江三角洲与广东东部零星分布着正相关地区。

对偏相关系数按照土地覆盖类型进行重新统计分析, 发现不同植被的 WUE 对气候变化的响应存在明显的差异, 如图 5 所示。常绿针叶林、农田、城市建设用地的 WUE 与均温表现为负相关关系, 而在常绿阔叶林、混交林、疏林灌木草地则为正相关关系。城市建设用地的负相关系数最大, 而常绿阔叶林与 WUE 的正相关系数最大。所有植被 WUE 与温差均表现为正相关关系。其中常绿针叶林的偏相关系数最大, 而后依次为常绿阔叶林、混交林、城市建设用地、疏林灌木草地和耕地。除城市建设用地外, 各个植被的 WUE 与最高温呈现负相关关系。其中, 常绿针叶林和混交林的负相关系数最大。除农田外, 各个植被的 WUE 与最低温呈现

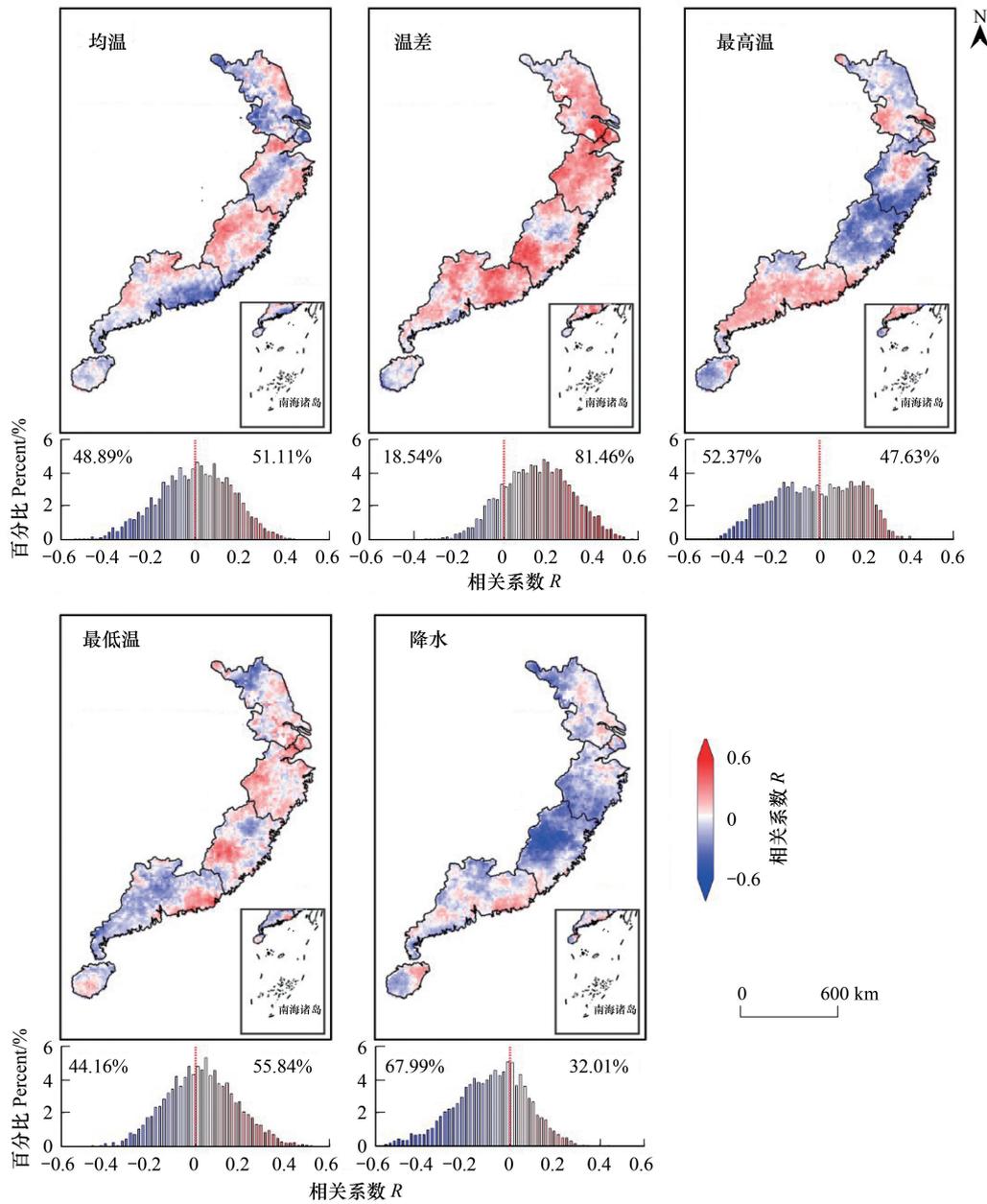


图4 WUE与平均温、温差、最高温、最低温、降水的偏相关系数的空间分布

Fig.4 The spatital distribution of partial correlation coefficient between WUE and average temperature, dirual range, the highest temperature, the lowest temperature and total precipitatio

下方的小图为各个气候变量与 WUE 偏相关系数的频率直方图

正相关关系。但疏林灌木草地的正相关关系不显著,且农田的负相关关系亦不显著。除了城市建设用地,其余植被 WUE 与降水呈负相关关系,且负相关系数均较大。混交林 WUE 与各个气候因子的相关关系和常绿阔叶林一致。农田 WUE 只与温差表现为正相关关系,城市建设用地只与均温呈现负相关关系。

对研究区内 WUE 对各个气候因子的偏相关系数随高程分布的统计结果表明,WUE 对气候变化的响应存在着明显的海拔梯度变化,如图 6 所示。在低海拔地区,WUE 与均温表现为负相关关系,200m 以上逐渐由负相关转变为正相关。随着高度的逐渐增加,正相关系数逐渐增加。但在 800m 以上地区,正相关系数呈现波动变化。温差与 WUE 在所有高度上都表现为正相关关系,在 50m 以下相关系数略有下降,之后随着高度增

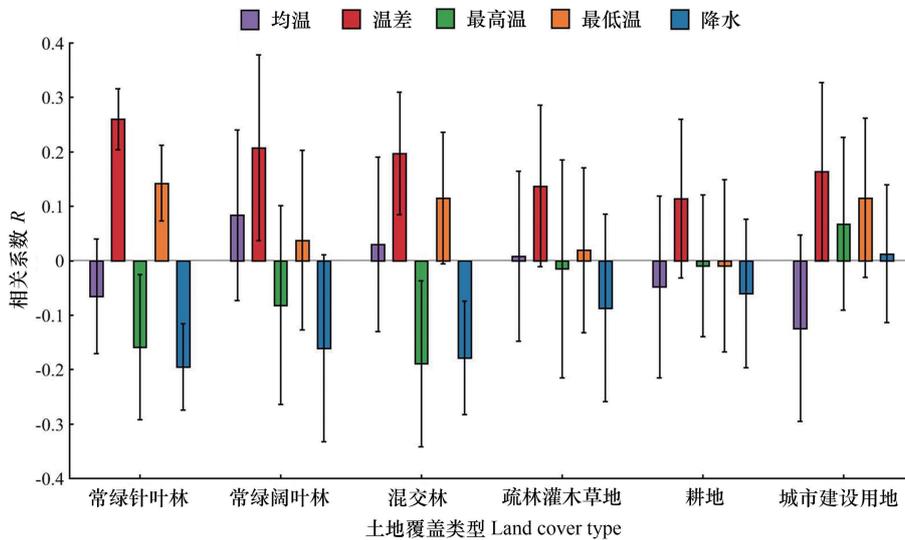


图5 不同土地覆盖类型下 WUE 与各个气候变量间的偏相关系数

Fig.5 The partial correlation coefficient between WUE and each climatic variable under different land cover types

加正相关系数单调增加。200m 以下,最高温与 WUE 的正相关系数先增加后减小,正相关系数最大值出现在 50m。200m 以上,两者转为负相关关系,且系数随着高度增加不断增加。最低温与 WUE 的相关系数在 20m 有一段波动变化,在 20m 以上呈现为正相关关系且随着高度增加系数不断减小。在 500m 以上,虽然仍表现为正相关关系但包含着强烈的震荡成分。在 500m 以下降水与 WUE 的负相关系数随着高度的增加而不断减小,在 500—1000m 负相关系数变化幅度逐渐变小,在 1000m 以上负相关系数趋于平缓。

3 讨论

3.1 WUE 对气候变化的响应随植被类型的分异

不同植被类型的 WUE 对气候变化的响应存在明显的差异。各个植被类型的 WUE 均与温差呈现正相关关系,说明在研究区内温差扩大有利于提高 WUE 具有普遍性。除城乡建设用地外,WUE 与最高温和降水量均为负相关。这是因为城市植被与自然植被和农田对气候变化的响应机制不同。气候变化对自然植被的生长状态具有决定性作用,但城市植被的变化可能更多地与社会经济发展水平和政策相关^[35]。对于自然植被,本研究区气候高温多雨,因此最高温的增加很可能会超过植被生长的最适宜温度,导致 GPP 的减少。并且最高温的增加会导致 ET 的增加,进一步导致 WUE 的减少。同样地,降水增多对光合作用的促进作用并不明显,反而使得蒸散发的增加,导致 WUE 的减少。对于城市的人工植被,由于人类的规划管理,其对气候变化的响应发生了转变,表现出 WUE 的增加^[36]。除农田和常绿阔叶林外,最低温对各种植被生长均表现出不同强度的促进作用。最低温增加,减少了植被受低温的胁迫,而促进植被生长,提高了 WUE。而农田受人类的规律管理,当面临寒潮威胁时会受到最大的保温措施;而常绿阔叶林的生长环境热量充足,尽管最低温降低,热量仍能保证植被正常生长的需求,因此最低温对这两种植被的影响有限。均温对常绿阔叶林和混交林表现出促进作用却对常绿针叶林表现出抑制作用。因为常绿阔叶林和混交林的最适宜温度比较高,而常绿针叶林的最适宜温度比较低^[37]。增加的均温仍会在常绿阔叶林的最适宜温度以下,促进植被生长,导致 GPP 增加;而对于常绿针叶林,增加的均温会超过其最适宜温度,反而变为了抑制植被生长,导致 GPP 减少。农田和城市绿地用水量,均温增加会导致 ET 增加,WUE 减少。

3.2 WUE 对气候变化的响应随高程的分异

WUE 对气候变化的响应表现出海拔梯度的差异。温度通常是影响植物 WUE 最直接的环境因素之

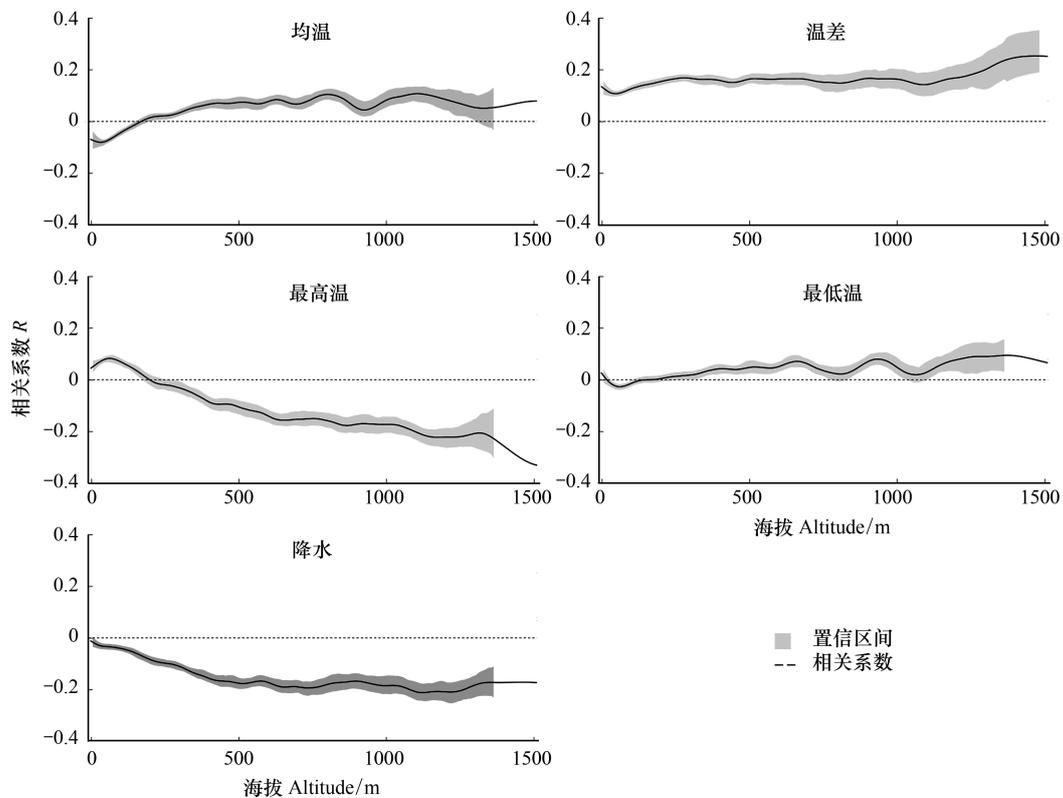


图 6 WUE 与各个气候变量间的偏相关系数随海拔的分异

Fig.6 The variation of partial correlation coefficient between WUE and each climatic variable with altitude

—^[2, 10, 38]。在低海拔地区 WUE 与均温呈现为负相关,而在中高海拔为正相关。这是因为温度对 WUE 具有一定的促进或抑制影响^[39–42]。温度对植被的作用存在一个阈值,即最适宜温度^[37]。温度升高会促进酶的活性,增强植被光合作用效率;但过高的温度又会导致气孔关闭和酶的失活^[43]。Xue 等^[43]和位贺杰等^[44]发现中国地区植被的最适宜温度在 15—25℃ 区间。研究区总体位于亚热带和热带,热量充足,因此在低海拔地区 WUE 与均温表现为负相关关系。而随着海拔升高导致温度降低至最适宜温度以下,WUE 与均温表现为正相关关系。

WUE 与温差在所有高度上都呈现正相关关系,且正相关系数随着海拔的升高而增加。昼夜温差的增加可以在白天促进光合作用效率,在夜晚降低呼吸作用,GPP 增加而水分损耗减少,促进 WUE 的增大^[45]。有研究^[37, 38, 46, 47]表明昼夜温差越大植物生长越旺盛,大温差有利于植物干物质的积累。海拔越高温差越大,因此温差对高海拔地区植物 WUE 的促进作用比低海拔地区更明显。

WUE 与最高温的负相关系数随着海拔的升高而增加。高温会使得光合作用的酶活性降低,且植物则增加蒸腾和蒸发的方式来给叶片表面降温^[48],光合作用受到抑制而蒸散作用仍在增加,使得 WUE 降低。WUE 与最低温在大部分地区表现为正相关关系,且随海拔的升高相关系数略有增加。最低温的增加可以防止植被在夜间遭受冻伤的危害,且在均温较低时夜温的作用效果更显著^[46, 47]。总体而言,高海拔地区的植物对温度的敏感性较高,相关系数随着海拔的升高而增加。

降水是影响 WUE 的重要因素^[13, 22, 23]。本研究中 WUE 与降水在所有高度上均表现为负相关关系,且这种负相关关系随着高度的增加而增强。同温度一样,降水对植物 WUE 的影响亦存在临界阈值。有研究表明中国地区降水对植被作用的拐点值是 600mm 左右^[41, 43]。本研究区处于亚热带/热带的湿润区,大部分地区年降水量超过 800mm,过多的降水量对植被生长只有微弱的促进作用,却极大地增加了蒸发量,这反而会导

致 WUE 的减少^[48]。并且随着海拔的升高,降水也会增加(比如迎风坡),这同时会导致日照时长和太阳辐射的减少^[49],抑制光合作用效率进而导致 WUE 的进一步减少。

今后“21 世纪海上丝绸之路”沿岸省份提高生态系统功能,需要注意 WUE 对气候响应的高程分异。由于低海拔地区主要是城市和农田,很难通过植树造林提高生态系统功能。可以预见造林主要发生在中高海拔地区。而在中高海拔地区,WUE 与均温、温差、最低温呈正相关,与降水和最高温呈负相关。在造林时需要考虑林木对温度、降水的敏感性,以更好地应对未来的气候变化。

4 结论

本文基于遥感 GPP 和 ET 数据计算“21 世纪海上丝绸之路”沿线省份 WUE,基于 EEMD 方法进行去趋势处理,利用偏相关方法分析研究区 WUE 对气候变化的响应及其高程分异,主要研究结论如下:

(1) WUE 与气候因子的相关性关系在空间分布上表现为日均温与 WUE 的正相关面积略小于负相关面积;日温差与 WUE 正相关的面积远大于负相关的面积,负相关区域仅分布在福建中部、雷州半岛和海南岛;最高温与 WUE 的正相关区域略小于负相关区域,而最低温与 WUE 的正相关区域略大于负相关区域;降水与 WUE 则是以负相关为主。

(2) WUE 与各个气候因子的关系在不同土地覆盖类型上存在明显的差异。均温只与常绿阔叶林和混交林的 WUE 呈现正相关,而与常绿针叶林、农田和城市建设用地表现出负相关。最高温与自然植被的 WUE 成负相关,而最低温则呈正相关。温差与所有植被的 WUE 均呈现正相关。除城市建设用地外,降水的增加会其余植被 WUE 的减少。

(3) WUE 对气候变化表现出海拔梯度变化。低海拔地区,WUE 与均温为负相关关系,200m 以上负相关转变为正相关,并且正相关系数随着海拔的升高而增加。温差与 WUE 在所有高度上都表现为正相关关系,且相关系数随着高程的增加而增加。在 200m 以下时,最高温与 WUE 呈正相关。200m 以上,两者转为负相关且负相关效应随着高程的增加而增强。最低温与 WUE 的相关性总体呈现为正相关关系但相关系数随着高度升高而波动增加。降水与 WUE 在所有高程上均呈现为负相关关系,但负相关系数的增强随着高度的增加而减弱。

参考文献(References):

- [1] Yu G R, Song X, Wang Q F, Liu Y F, Guan D X, Yan J H, Sun X M, Zhang L M, Wen X F. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 2008, 177(4): 927-937.
- [2] 李明旭,杨延征,朱永安,陈槐,彭长辉.气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势.生态学报,2016, 36(4): 936-945.
- [3] 胡中民,于贵瑞,王秋风,赵风华.生态系统水分利用效率研究进展.生态学报,2009,29(3): 1498-1507.
- [4] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, Dragoni D, Munger J W, Schmid H P, Richardson A D. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature*, 2013, 499:324-327.
- [5] Beer C, Ciais P, Reichstein M, Baldocchi D, Law B E, Papale D, Soussana J F, Ammann C, Buchmann N, Frank D, Gianelle D, Janssens I A, Knohl A, Köstner B, Moors E, Rouspard O, Verbeeck H, Vesala T, Williams C A, Wohlfahrt G. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2018.
- [6] Horion S, Ivits E, De Keersmaecker W, Tagesson T, Vogt J, Fensholt R. Mapping European ecosystem change types in response to land-use change, extreme climate events, and land degradation. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(8): 951-963.
- [7] 郑涵,于贵瑞,朱先进,王秋风,张雷明,陈智,孙晓敏,何洪林,苏文,王艳芬,韩士杰,周国逸,赵新全,王辉民,欧阳竹,张宪洲,张扬建,石培礼,李英年,赵亮,张一平,闫俊华,王安志,张军辉,郝彦宾,赵风华,张法伟,周广胜,林光辉,陈世苹,刘绍民,赵斌,贾根锁,张旭东,张玉翠,古松,刘文兆,李彦,王文杰,杨大文,张劲松,张志强,赵仲辉,周石砾,郭海强,沈彦俊,徐自为,黄辉,孟平.2000—2010 年中国典型陆地生态系统实际蒸散量和水分利用效率数据集.中国科学数据,2019,4(1): 55-68.
- [8] Li Y Z, Fan J W, Hu Z M, Shao Q Q, Harris W. Comparison of evapotranspiration components and water-use efficiency among different land use patterns of temperate steppe in the Northern China pastoral-farming ecotone. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(6): 827-841.
- [9] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点.冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.

- [10] 李肖娟,张福平,王虎威,雷声剑,高张.黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系.中国沙漠,2017,37(4): 733-741.
- [11] 张巧凤,刘桂香,于红博,包玉海.基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态.草地学报,2016,24(2): 286-293.
- [12] 史晓亮,吴梦月,张娜,丁皓.三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应.生态学杂志,2020,39(5): 1651-1663.
- [13] 邹杰,丁建丽,秦艳,王飞.遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应.农业工程学报,2018,34(9): 145-152.
- [14] Wen Y Y, Liu X P, Xin Q C, Wu J, Xu X C, Pei F S, Li X, Du G M, Cai Y L, Lin K, Yang J, Wang Y P. Cumulative Effects of Climatic Factors on Terrestrial Vegetation Growth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(4): 789-806.
- [15] de Beurs K M, Henebry G M. A statistical framework for the analysis of long image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(8): 1551-1573.
- [16] Pan N Q, Feng X M, Fu B J, Wang S, Ji F, Pan S F. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. *Remote sensing of Environment*, 2018, 214: 59-72.
- [17] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [18] Ji F, Wu Z H, Huang J P, Chassignet E P. Evolution of land surface air temperature trend. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 462-466.
- [19] Liu H Y, Jia J H, Lin Z S, Wang Z Y, Gong H B. Relationship between net primary production and climate change in different vegetation zones based on EEMD detrending - A case study of Northwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107276.
- [20] Li H D, Jiang J, Chen B, Li Y K, Xu Y Y, Shen W S. Pattern of NDVI-based vegetation greening along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and its response to global warming. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(3): 186.
- [21] Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 424-430.
- [22] Zou J, Ding J L, Welp M, Huang S, Liu B H. Using MODIS data to analyse the ecosystem water use efficiency spatial-temporal variations across Central Asia from 2000 to 2014. *Environmental Research*, 2020, 182: 108985.
- [23] Tang S B, Lai Y, Tang X L, Phillips O L, Liu J F, Chen D X, Wen D Z, Wang S L, Chen L C, Tian X J, Kuang Y W. Multiple environmental factors regulate the large-scale patterns of plant water use efficiency and nitrogen availability across China's forests. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 034026.
- [24] 杨忍,牟乃夏,彭澎,刘希亮,张恒才,陆锋.“海上丝绸之路”沿线重要港口竞争力评价.地球信息科学学报,2018,20(5): 623-631.
- [25] 禹丝思,孙中昶,郭华东,赵相伟,孙林,吴孟凡.海上丝绸之路超大城市空间扩展遥感监测与分析.遥感学报,2017,21(2): 169-181.
- [26] 王列辉,朱艳.基于“21 世纪海上丝绸之路”的中国国际航运网络演化.地理学报,2017,72(12): 2265-2280.
- [27] 王列辉,张楠翌,朱艳.“21 世纪海上丝绸之路”航运服务业网络格局研究.地理科学,2020,40(10): 1663-1670.
- [28] 王成,王茂军,王艺.中国嵌入“21 世纪海上丝绸之路”航运网络的关键节点识别.地理科学进展,2018,37(11): 1485-1498.
- [29] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, Bonnefond J M, Chen J Q, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E, Verma S B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1416-1431.
- [30] Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S, Liu W B. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982-2012: Validations and spatiotemporal analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(8): 4326-4351.
- [31] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [32] Huang N E, Wu Z H. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(2): RG2006.
- [33] Wu Z H, Huang N E, Long S R, Peng C K. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Science of United States of America*, 2007, 104(38): 14889-14894.
- [34] Jiao F S, Liu H Y, Xu X J, Gong H B, Lin Z S. Trend Evolution of Vegetation Phenology in China during the Period of 1981-2016. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 572.
- [35] 刘沁萍,杨永春,田洪阵,顾磊,张博.快速城市化时期中国城市建成区植被状况的时空分异特征.自然资源学报,2014,29(2): 223-236.
- [36] 王涛,李贝贝,裴春营.植被 NDVI 对城市扩展及气候变化的响应——以西安及其附近区域为例.干旱区地理,2017,40(2): 388-396.
- [37] Chen Y Z, Feng X M, Fu B J, Wu X T, Gao Z. Improved Global Maps of the Optimum Growth Temperature, Maximum Light Use Efficiency, and Gross Primary Production for Vegetation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(4): e2020JG005651.
- [38] 李辉东,关德新,袁凤辉,王安志,金昌杰,吴家兵,李峥,井艳丽.科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素.生态学报,2015, 35(2): 478-488.

- [39] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2031-2044.
- [40] 张春敏, 梁川, 龙训建, 卫仁娟. 江源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 146-155.
- [41] 仇宽彪, 成军锋. 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 256-260.
- [42] Medlyn B E, Dreyer E, Ellsworth D, Forstreuter M, Harley P C, Kirschbaum M U F, Le Roux X, Montpied P, Strassmeyer J, Walcroft A, Wang K, Loustau D. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(9): 1167-1179.
- [43] Xue B L, Guo Q H, Otto A, Xiao J F, Tao S L, Li L. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-18.
- [44] 位贺杰, 张艳芳, 董孝斌, 鲁纳川, 王雪超. 渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [45] 位贺杰. 渭河流域水分生产效率遥感模型构建与估算研究. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [46] 杨再强, 王学林, 彭晓丹, 赵翔, 袁小康, 韩秀君. 人工环境昼夜温差对番茄营养物质和干物质分配的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 138-147.
- [47] 李莉, 李佳, 高青, 陈金星. 昼夜温差对番茄生长发育、产量及果实品质的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2700-2706.
- [48] Tian H Q, Chen G S, Liu M L, Zhang C, Sun G, Lu C Q, Xu X F, Ren W, Pan S F, Chappelka A. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [49] Liu Q, Fu Y S H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R, Piao S L. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.